



CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR
DE INGENIEROS DE LA
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMAS
INTERNACIONALES DE ENSAYOS DE VERIFICACIÓN
DE BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR
COORDENADAS: ASME B89.4.22-2004 Y VDI 2617_9-2009**

PROYECTO FIN DE CARRERA PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIEGO NOGUERAS HERRERO

Dirigido por JORGE SANTOLARIA MAZO

Mayo 2011



ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMAS INTERNACIONALES DE ENSAYOS
DE VERIFICACIÓN DE BRAZOS ARTICULADOS DE MEDICIÓN POR
COORDENADAS: ASME B89.4.22-2004 Y VDI 2617_9-2009.

RESUMEN

El presente proyecto surge ante la necesidad de calibración y verificación de los llamados “brazos articulados de medición por coordenadas”. En la actualidad no existe un procedimiento estándar normalizado y cada laboratorio metrológico que presta este servicio realiza un procedimiento distinto, lo que hace imposible la valoración y comparación de resultados.

Hasta hoy día solo existen una norma que regulariza una evaluación fiable del comportamiento de un brazo de medida. Se trata de la norma americana ASME B89.4.22-2004. Sin embargo, a nivel europeo, existe además una recomendación que aconseja una serie de ensayos para la verificación de brazos articulados de medición por coordenadas. Esta recomendación recibe el nombre de VDI 2617.

Ambos procedimientos, la norma americana y la recomendación europea, establecen ensayos diferentes para evaluar las mismas características metrológicas de los brazos de medida. Es por ello, que el presente proyecto, ha tenido como objetivo principal la comparación de ambas normas para evaluar su efectividad en la detección de influencias sobre la precisión volumétrica y repetibilidad de estos equipos.

Por todo ello, se han comparado los resultados de evaluación obtenidos mediante la realización de ensayos de verificación recogidos en ambos documentos sobre un brazo articulado de medición por coordenadas de 7 ejes, extrayendo de este modo a partir de los resultados, conclusiones de la adecuación de los procedimientos a la verificación final del equipo. La realización de ensayos comprende el uso de un brazo de medida dispuesto sobre un trípode, una barra patrón de esferas con soporte móvil orientable y un asiento cinemático para evaluación de repetibilidad de punto. Mediante estos elementos es posible reproducir los 6 ensayos totales recogidos en ambas normas y obtener los resultados de evaluación en ambos casos.

Dado que un procedimiento estándar para verificación de brazos es una reivindicación tradicional desde los laboratorios de metrología, se ha realizado además una comparación de ambos métodos desde el punto de vista económico y de necesidades de equipamiento y espacio necesarios para llevar a cabo los ensayos, como si de un laboratorio metrológico se tratara.

Para la realización del proyecto se ha utilizado un brazo articulado marca FARO modelo Platinum de 7 ejes con 1,2m de radio de volumen de medida, un trípode de fundición, una barra patrón de esferas UNIMETRIK de 22mm de diámetro y de 1,5 m de longitud, un soporte de precisión Koba para el posicionamiento de la barra patrón, y un asiento cinemático cónicos FARO. Los ensayos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Metrología de Fabricación del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, una sala de ambiente controlado para reproducir las condiciones que exigen los procedimientos.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Justificación del proyecto | 1 |
| 1.2 Objetivos del proyecto | 3 |
| 1.3 Ámbito del proyecto | 3 |
| 1.4 Material utilizado | 3 |
| 1.4.1 Laboratorio de Metrología..... | 3 |
| 1.4.2 Brazo de medición por coordenadas..... | 4 |
| 1.4.3 Elementos de sujeción y patrones..... | 6 |
| 1.4.4 Software..... | 6 |
| Capítulo 2. Planificación | 8 |
| Capítulo 3. Desarrollo del proyecto. Tratamiento de datos | 10 |
| 3.1 Norma ASME B89.4.22-2004. Resumen de resultados..... | 10 |
| 3.1.1 Prueba de diámetro efectivo..... | 11 |
| 3.1.2 Prueba de articulación de punto único..... | 12 |
| 3.1.3 Prueba de precisión longitudinal volumétrica..... | 18 |
| 3.2 Recomendación VDI 2617. Resumen de resultados..... | 23 |
| 3.2.1 Prueba de error de palpado..... | 24 |
| 3.2.1.1 Error de palpado de posición de la esfera..... | 27 |
| 3.2.1.2 Error de palpado de tamaño de la esfera..... | 27 |
| 3.2.1.3 Error de palpado de forma de la esfera..... | 27 |
| 3.2.2 Prueba de error de indicación del tamaño de la medición..... | 28 |
| 3.2.2.1 Prueba de error de la medición de longitudes en el volumen de medición completo..... | 28 |
| 3.2.2.2 Prueba de error de la medición de longitudes en volúmenes de medición parciales..... | 31 |
| Capítulo 4. Comparación de resultados..... | 35 |
| 4.1 Análisis de errores en la medición de tamaños..... | 35 |
| 4.2 Análisis de errores en la medición de la posición..... | 37 |
| 4.3 Análisis de errores en la medición de longitudes..... | 39 |
| 4.4 Criterios de verificación de resultados..... | 41 |
| Capítulo 5. Análisis económico..... | 43 |
| Capítulo 6. Conclusiones..... | 47 |

| | |
|--|-----------|
| ANEXOS..... | 49 |
| A.1 Equipamiento..... | 51 |
| A.1.1 Brazo articulado FARO “PLATINUM” | 52 |
| A.1.1.1 Equipamiento..... | 53 |
| A.1.1.2 Características..... | 53 |
| A.1.1.3 Aplicaciones más comunes..... | 54 |
| A.1.1.4 Especificaciones de rendimiento..... | 54 |
| A.1.1.5 Especificaciones del equipo..... | 54 |
| A.1.2 Base de soporte FARO para brazo articulado..... | 56 |
| A.1.3 Barra de patrón de esferas UNIMETRIK..... | 57 |
| A.1.3.1 Especificaciones del equipo..... | 57 |
| A.1.4 Soporte KOBA para barra de patrón de esferas..... | 62 |
| A.2 Calibración..... | 63 |
| A.3 ASME B89.4.22-2004..... | 66 |
| A.3.1 Prueba de diámetro efectivo..... | 67 |
| A.3.2 Prueba de articulación de punto único..... | 76 |
| A.3.3 Prueba de precisión longitudinal volumétrica..... | 92 |
| A.4 VDI 2617_9-2009..... | 127 |
| A.4.1 Prueba de error de palpado..... | 128 |
| A.4.1.1 Error de posición..... | 139 |
| A.4.1.2 Error de tamaño..... | 141 |
| A.4.1.3 Error de forma..... | 144 |
| A.4.2 Prueba de error de tamaño de la medición. Volúmenes parciales..... | 148 |
| A.4.2.1 Error máximo admisible..... | 291 |

Capítulo 1. Introducción

1.1 Justificación del proyecto.

Los brazos articulados de medición por coordenadas (AACMMs), también llamados máquinas de medir por coordenadas de brazo articulado, constituyen un grupo especial de equipos dentro de la medición por coordenadas, por sus características especiales y diferencias con respecto a las máquinas de medición por coordenadas (MMCs) tradicionales. Aunque su función es la misma, es decir, determinar las coordenadas X, Y, Z de un punto en su volumen de trabajo con respecto a un sistema de referencia global, la diferencia fundamental reside en su estructura cinemática. Mientras que las MMCs, ya sean de puente, gantry, o de brazo horizontal, tienen una configuración tal que permite la medición del desplazamiento físico de cada uno de sus tres ejes, en los AACMMs la obtención del punto medido es producto de una serie de transformaciones matemáticas, regidas por su modelo. Los AACMMs adoptan su estructura cinemática y modelado de los brazos robot y, al igual que estos, están formados por una serie de tramos rectos unidos por articulaciones giratorias que confieren los grados de libertad necesarios para alcanzar las posiciones de medida requeridas.



Fig. 1.1 Máquina de medir por coordenadas (MMC)



Fig. 1.2 Brazo de medir por coordenadas (AACMM)

La progresiva aparición de los AACMMs ha venido acompañada de una falta de estándares sobre procedimientos de calibración y verificación, tanto desde el punto de vista del usuario como desde el punto de vista del fabricante, lo que afecta a la definición de contratos de compraventa de estos equipos desde el punto de vista de los

requerimientos de precisión que debe cumplir el equipo y de los procedimientos de medida que se usarán en la comprobación de estos requerimientos. Los procedimientos de evaluación que comenzaron a utilizar los fabricantes de AACMMs para determinar las características metrológicas de sus brazos se basaron en los procedimientos marcados por los predecesores de los tres estándares principales para evaluar la precisión en máquinas de medir por coordenadas en la actualidad, UNE-EN ISO 10360, ASME B89.4.1 y VDI/VDE 2617. Todavía hoy en día se realizan pruebas de evaluación basadas en estos estándares, con objeto de evaluar y comparar la precisión de un brazo desde el punto de vista de las MMCs.

El uso de distintos procedimientos basados en las normas apuntadas y su adaptación a los brazos de medida provoca una gran heterogeneidad en la presentación de resultados, haciendo imposible la comparación directa entre equipos evaluados por métodos distintos.

Con el fin de acabar con esta falta de normalización y estandarizar tanto la presentación de resultados como los métodos utilizados en evaluación, se elaboró en el año 2004 la única norma existente en el ámbito de verificación de los AACMMs, la norma **ASME B89.4.22-2004**, que recoge la experiencia acumulada en la definición y realización de procedimientos de evaluación propios de cada fabricante recomendando los procedimientos que han de seguirse para una evaluación fiable del comportamiento de un brazo de medida en palpado por contacto con palpadores pasivos y activos. Este documento constituyó un hito histórico en la evaluación de los AACMMs, sentando las bases para una completa estandarización en este campo. Aunque esta norma ASME es la única que rigurosamente puede ser considerada como una norma internacionalmente aceptada, recientemente (2009) se ha publicado la **parte 9 de la recomendación VDI 2617**, que realiza recomendaciones de ensayo para la verificación de brazos articulados de medición por coordenadas. Dado que muchas de las recomendaciones VDI con el tiempo se convierten en parte o en su totalidad en normas DIN, su prestigio hace que se consideren más allá de una recomendación técnica y se acepten internacionalmente como procedimientos estándar.

En la actualidad estos son los dos únicos documentos aceptados internacionalmente para establecer con garantías de trazabilidad ensayos conducentes a la verificación de los AACMMs. Por ello, y dado que ambas normas establecen ensayos diferentes para evaluar las mismas características metrológicas de los brazos de medida, en el presente proyecto se plantea como objetivo principal la comparación de ambas normas para evaluar su efectividad en la detección de influencias sobre la precisión volumétrica y repetibilidad de estos equipos. Cada una de ellas establece recomendaciones similares de preparación de los ensayos, pero definen ensayos completamente diferentes para la evaluación. Esta circunstancia acarrea de nuevo incertidumbre acerca de la efectividad o la adecuación de los procedimientos estándar de ambos documentos.

No existe un procedimiento estándar o recomendación técnica por parte de las entidades nacionales de acreditación por lo que no es posible la acreditación de laboratorios para realizar pruebas de verificación de AACMMs trazables y por tanto comparativamente fiables, y por tanto no es posible la emisión por su parte de un certificado acreditado de verificación.

1.2 Objetivos del proyecto.

El desarrollo principal del proyecto ha consistido en la realización de los seis test de medición contemplados, tres en tanto en la norma ASME B89.4.22-2004 y tres en la parte 9 de la recomendación VDI 2617.

Se pretenden comparar los resultados de evaluación obtenidos mediante la realización de los ensayos de verificación recogidos en los dos documentos sobre un brazo articulado de medición por coordenadas de 7 ejes, extrayendo de este modo a partir de los resultados, conclusiones de la adecuación de los procedimientos a la verificación final del equipo.

Dado que un procedimiento estándar para verificación de brazos es una reivindicación tradicional desde los laboratorios de metrología, se ha realizado además una comparación de ambos métodos desde el punto de vista económico y de necesidades de equipamiento y espacio necesarios para llevar a cabo los ensayos. El hecho de no existir en España un procedimiento normalizado o recomendación por parte de Enac, imposibilita la acreditación de laboratorios para la realización trazable y comparativa de este tipo de ensayos y la imposibilidad de entregar un certificado acreditado desde un laboratorio, con sus correspondientes implicaciones de fiabilidad para los potenciales demandantes de verificación de AACMMs. En la actualidad se ha comenzado el trabajo desde Enac para la obtención de una recomendación mediante la cual puedan acreditarse los laboratorios de metrología dimensional para realizar estos ensayos. Mediante este proyecto se persigue además tener criterios objetivos para evaluar un posible procedimiento de verificación futuro mediante el estudio de los ensayos planteados a partir de los resultados obtenidos siguiendo los procedimientos vigentes.

1.3 Ámbito del proyecto.

Con el fin de dar una mayor visión práctica al proyecto nos pondremos en la piel de un laboratorio de metrología, que, ante la inexistencia de una reglamentación estatal sobre cuál debe ser el procedimiento de verificación de los brazos de medición por coordenadas, decide realizar un estudio real de las alternativas existentes. El fin de este estudio es establecer un proceso lo más fiable y económico posible que permita ofrecer a sus clientes el servicio de verificación de estos útiles de medición.

1.4 Material utilizado.

1.4.1 Laboratorio de metrología

Tanto la normativa ASME como la recomendación VDI son precisas en este aspecto. Todas las mediciones se deben realizar en ambientes controlados a una temperatura de 20 ± 5 grados Celsius y en un entorno exento de vibraciones. Fuera de este rango debería aplicarse unos factores de corrección a las mediciones.

Para evitar tener que aplicar factores de corrección, las mediciones se han realizado en el laboratorio de metrología del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza.

Este laboratorio es una sala de ambiente controlado. Concretamente, las mediciones se realizaron a 20,5 °C y una humedad del 45%.



Fig. 1.3 Sistema de control ambiental del laboratorio de metrología

1.4.2 Brazo de medición por coordenadas

Los procesos de verificación están orientados hacia brazos de medición por coordenadas de al menos cuatro ejes.

Dichos aparatos, cuya función es determinar las coordenadas X, Y, Z de un punto en su volumen de trabajo con respecto a un sistema de referencia global, están formados por una serie de tramos rectos unidos por articulaciones giratorias que proporcionan los grados de libertad necesarios para alcanzar las posiciones de medida requeridas. Otra característica de gran importancia es su modo de operación manual, por la cual se debe tener en cuenta la posible influencia del operario que lo maneje.

Un brazo articulado de medida consiste en una serie de tramos conectados generalmente por articulaciones dobles que permiten realizar al brazo los giros necesarios para alcanzar una posición en el espacio. Estas articulaciones dobles materializan giros entorno a ejes perpendiculares entre sí. Su naturaleza de operación manual hace que no se presenten configuraciones con articulaciones prismáticas que complicarían su manipulación, por lo que, los brazos de medida existentes en la actualidad, presentan configuraciones basadas en articulaciones giratorias.

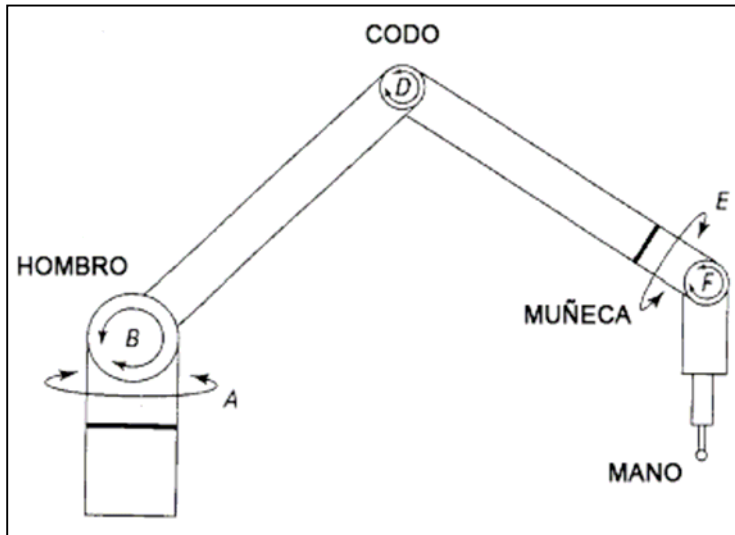


Fig. 1.4 Zonas y configuración de un brazo de medición.

En todos los brazos de medida, es posible diferenciar cuatro zonas. La forma de denominar a estas cuatro zonas es hombro, codo, muñeca y mano, por su similitud con un brazo humano.

Existen diferentes configuraciones dependiendo del número de ejes, y existen diferentes volúmenes de trabajo definidos para brazos de medida en función de la aplicación final a la que vayan destinados y al catálogo de cada fabricante. El volumen de trabajo de un brazo de medida está determinado por su longitud total, que define una esfera de radio la longitud del brazo. La forma habitual de especificar el rango de trabajo es mediante la indicación de la longitud total del brazo, es decir, del radio de la esfera. Los rangos disponibles en el mercado varían normalmente entre 1 y 3,5 metros, siendo posibles otros rangos en función de la aplicación final del brazo.

En nuestro caso práctico hemos hecho los ensayos de verificación de estado sobre un brazo de medición de siete ejes de gama alta montado sobre trípode con las siguientes características:



Fig. 1.5 Brazo Faro Platinum

- Modelo: Brazo Faro Platinum 7 ejes.
- Rango de medida: 2,4 metros (diámetro del volumen de trabajo).
- N° de serie: P08-05-0521419.
- Certificado 2sigma (Single point articulation performance test): $\pm 0,030\text{mm}$.
- Fecha certificación: 14 de Noviembre de 2007.

1.4.3 Elementos de sujeción y patrones

- Patrón de esferas UNIMETRIK con 15 esferas de 22mm de diámetro con una distancia entre esferas contiguas de 100mm. En total la barra patrón dispone de un campo de medida efectivo de 1400mm.
- Soporte de precisión KOBA para el amarre y posicionado de la barra patrón.
- Asiento cinemático cónico FARO.



Fig. 1.6 Soporte de precisión y barra patrón



Fig. 1.7 Asiento cinemático cónico

1.4.4 Software

Para llevar a cabo el proyecto ha sido necesario el aprendizaje y uso de distintos programas de software que facilitaran labores tediosas como la recogida de datos u otras muy complicadas como el cálculo y comparación de resultados.

- **CAM2 MEASURE.**

El software que proporciona la empresa FARO para sus brazos articulados de medición por coordenadas es el CAM2 Measure, programa de sencillo manejo y con un interface bien distribuido para facilitar su utilización por parte del usuario



CAM2 Measure es un programa de recogida y tratado de datos que se capturan con el brazo de medición, y con el cual es posible realizar cálculos sencillos y obtener resultados tales como, por ejemplo, distancias, longitudes, radios o diámetros.

En nuestro proyecto se ha utilizado el software para acciones tan diversas como:

- Interface de comunicación con el brazo de medición
- Medida de esferas y de distancias entre sus respectivos centros.
- Medida de asientos cónicos o cinemáticos
- Toma de parámetros de medición tales como fecha y hora, temperatura, desviaciones teóricas o errores.

- **MATLAB.**

El software empleado para el cálculo de las funciones y formulas complejas, que incluyen los dos métodos de verificación, ha sido el programa matemático MATLAB.



MATLAB es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

- **OTROS.**

Además se han utilizados otros software de carácter menos específicos pero que han sido de gran ayuda en la elaboración del proyecto. Inicialmente se utilizó **Microsoft Project** para la planificación de las diversas tareas que iba a suponer el proyecto. Se empleó el editor de textos **Ultraedit** en la maquetación de los archivos de datos obtenidos por CAM2 para poder adaptar y ordenar la gran cantidad de datos generada y adaptarlos para su procesamiento en MATLAB. Para la elaboración de generación de los resultados finales y su representación gráfica se ha usado **Microsoft Excel**. Finalmente para la preparación de la memoria descriptiva así como la presentación se han usado Microsoft Word, PowerPoint, SolidEdge y algunos otros.

Capítulo 2. Planificación

Para la planificación se establecieron una serie de tareas que se fueron repartiendo a lo largo del tiempo del proyecto. Las tareas que se realizaron son las siguientes:

- **Plantear y establecer los objetivos del proyecto**
- **Estudio y análisis de la norma ASME B89.4.22-2004**
- **Estudio y análisis de la Parte 9 de la recomendación VDI 2617_9-2009**
- **Planificación del método y la estructura de la medición.**
- **Ensayos de medición y calibración del brazo. Aprendizaje.**
- **Test de verificación según ASME B89.4.22-2004**
- **Test de verificación según VDI 2617_9-2009**
- **Volcado de los datos reflejados en CAM2 Measure**
- **Contacto y aprendizaje del software MATLAB**
- **Procesado de archivos de datos con ULTRAEDIT para su exportación**
- **Tratamiento de datos y cálculo de funciones mediante MATLAB**
- **Cálculo y representación de resultados mediante EXCEL.**
- **Interpretación y análisis de resultados.**
- **Redacción de memoria descriptiva.**

Algunas de estas tareas coincidieron en el tiempo. Otras implicaban su terminación para comenzar con la siguiente. Todas estas circunstancias quedan reflejadas en la siguiente figura creada mediante Microsoft Project.



Fig. 2.1 Diagrama de Gantt del proyecto

Capítulo 3. Desarrollo del proyecto.

A continuación se pasa a describir los dos procedimientos estudiados y reproducidos, como se han llevado a cabo y un resumen de los resultados obtenidos. El texto completo así como la totalidad de los cálculos y valores obtenidos quedan reflejados en la sección de Anexos.

3.1 Norma ASME B89.4.22-2004. Guión de medición.

La norma “ASME B89.4.22-2004”, es elaborada por la “American Society of Mechanical Engineers” (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

La ambigüedad de las especificaciones de las máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMM) dificultan las evaluaciones comparativas de sus características. Por ello y por el creciente uso de esta clase de equipos de medida, el comité de normas ASME B89 elegido, establece una norma industrial americana aplicable a estas máquinas. En la reunión de octubre de 1994, se estableció el equipo de proyecto B89.2.22 para desarrollar esta norma.

En la medida de lo posible, esta norma se asemejará a la “ASME B89.4.1b-2001” para máquinas de medida de coordenadas convencionales. Se ha realizado también un intento para que la norma sea compatible con normas existentes y las nuevas normas internacionales.

Esta norma se refiere a la evaluación de máquinas de medición de coordenadas de brazo articulado mediante el suministro de definiciones y procedimientos de pruebas. Estos procedimientos deben permitir a los usuarios determinar si una máquina de medición de coordenadas de brazo articulado es apropiada para sus requerimientos específicos. También debe proporcionar una información precisa de comparación de máquinas de diferentes fabricantes y proporcionar una determinación de si una máquina de medición de coordenadas de brazo articulado cumple con los requisitos contractuales sin negociaciones después de que la máquina sea comprada.

La intención de esta norma es especificar los métodos más simples que pueden ser usados para una evaluación razonable. Se reconoce que una evaluación más completa puede ser apropiada para aplicaciones especiales. Estos métodos, sin embargo, se deben especificar detalladamente en la especificación de la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado.

En síntesis, el principal objetivo de la norma “ASME B89.4.22-2004”, es clarificar el procedimiento de evaluación de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado (AACMMs) y facilitar las comparaciones entre máquinas. La norma “ASME B89.4.22-2004” define los métodos de prueba capaces de obtener resultados adecuados para la mayoría de de máquinas de medición por coordenadas de brazo articulado y no pretende remplazar pruebas más completas que son requeridas para aplicaciones especiales.

Esta norma propone la realización de diferentes pruebas para llevar a cabo la evaluación de las características metrológicas de los brazos de medida:

- **Prueba de diámetro efectivo.**
- **Prueba de articulación de punto único, de repetibilidad de punto o de cono.**
- **Prueba de precisión longitudinal volumétrica o de rendimiento volumétrico.**

3.1.1 Prueba de diámetro efectivo (Effective Diameter Performance Test):

Esta prueba consiste en medir una esfera calibrada, de diámetro entre 10 y 50 mm, posicionada aproximadamente a la mitad de distancia del alcance del brazo. La esfera debe ser medida tres veces en la misma posición. Cada una de las tres medidas debe realizarse con nueve puntos distribuidos en el hemisferio superior de la esfera, cuatro puntos en el ecuador, cuatro puntos a 45 ° y girados 45° con respecto a los tomados en el ecuador y un punto en el polo de la esfera. A lo largo de las tres medidas, las articulaciones del brazo deben cambiar lo menos posible.

El resultado de esta prueba en brazos de medida debe reflejar la desviación máxima en valor absoluto entre el diámetro de la esfera nominal y el diámetro medido en las tres medidas realizadas.

| Table 1 Diameter Deviations | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Formula | Diameter Deviation, μm |
| $D_1 - D_{\text{cal}}$ | |
| $D_2 - D_{\text{cal}}$ | |
| $D_3 - D_{\text{cal}}$ | |
| Max. deviation | |

Fig. 3.1 Tabla de resultados. Prueba de diámetro efectivo.

Para llevar a cabo este test se ha utilizado la esfera número 7 de la barra patrón, situándola a una altura de 770mm y una distancia de 700mm del brazo. Los resultados obtenidos en milímetros han sido los siguientes:

| | D | Dcal | DESV |
|----------|----------------|---------|---------------|
| ESFERA 1 | 21,9871 | 21,9999 | 0,0127 |
| ESFERA 2 | 21,9691 | 21,9999 | 0,0307 |
| ESFERA 3 | 21,9924 | 21,9999 | 0,0074 |
| | MAXDESV | | 0,0307 |

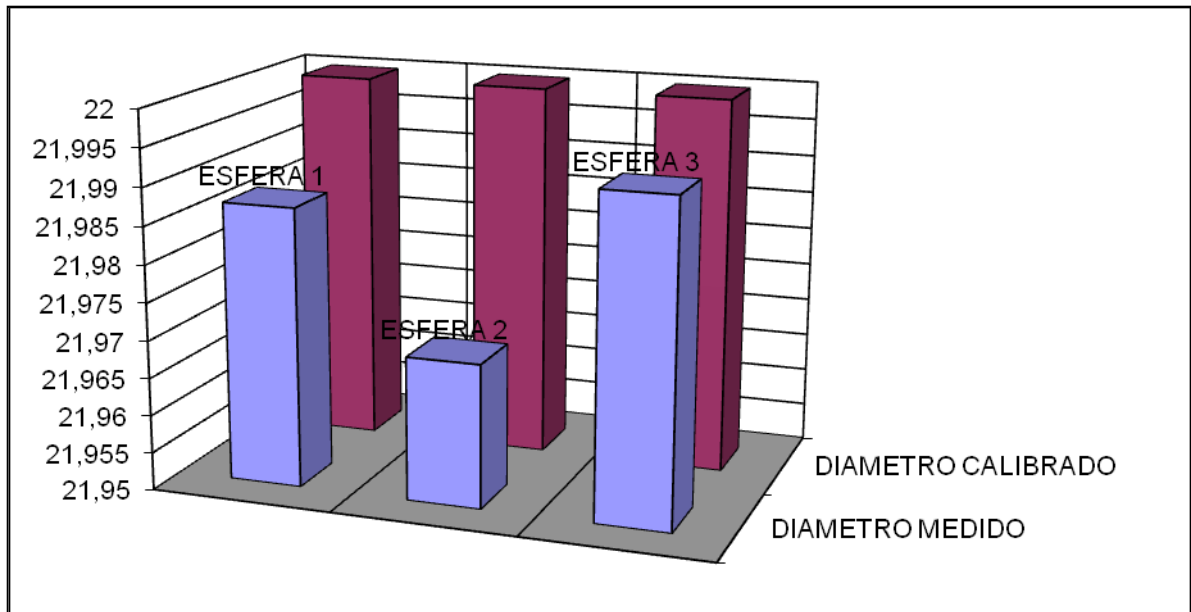


Fig. 3.2 Resultados. Prueba de diámetro efectivo

3.1.2 Prueba de punto único (Single-Point Articulation Performance Test):

El objetivo de este test es determinar la capacidad del brazo de repetir la medida de un mismo punto desde orientaciones diferentes, lo que exige configuraciones del brazo diferentes, cubriendo así distintas configuraciones de ángulos de articulación para una mismo punto medido.

Esta prueba no determina la repetibilidad de medida, ya que es necesario mantener las condiciones de medida invariadas entre captura de puntos. De este modo, el resultado de este ensayo de verificación arrojará la capacidad combinada de todos los elementos del sistema de medida para repetir las coordenadas de un punto fijo en el espacio que, dada la configuración cinemática del brazo, se considerará como su repetibilidad.

Para intentar conseguir el máximo número de orientaciones del brazo dentro del volumen de medida, la prueba se realiza en tres puntos del espacio distintos. Como en la mayor parte de sistemas de medida, es muy difícil establecer el mínimo número de posiciones del espacio de trabajo que deben cubrirse en cualquier test de evaluación o verificación para garantizar resultados extrapolables a todo el volumen de medida. La elección de tres posiciones para materializar los puntos fijos en el espacio tiene por objetivo aumentar el número de combinaciones de articulación que se comprobarán, aunque cualquier procedimiento de evaluación más profundo, exige la realización de esta prueba en muchos más puntos del espacio.

El ensayo se realiza materializando el punto fijo a medir mediante un asiento o mediante asientos cinemáticos. El objeto de estos asientos es mantener el contacto entre el asiento y la esfera del palpador montado en el brazo en tres puntos, independientemente de la orientación de la mano del brazo. De este modo se asegura que, para todos los datos capturados, el centro de la esfera palpadora, que representa el punto medido, se encuentre siempre en la misma posición física.

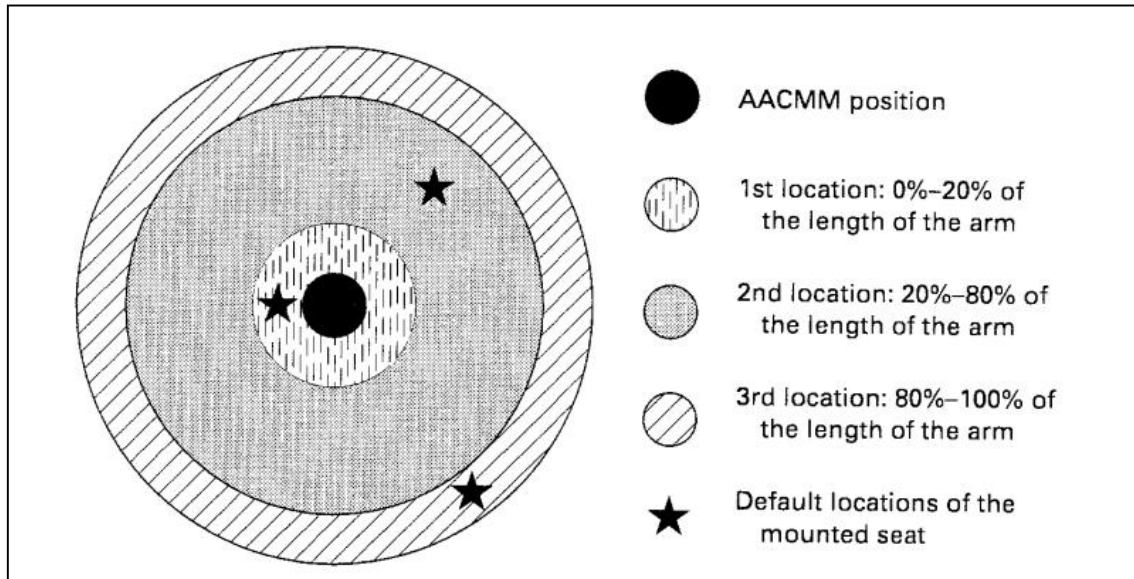


Fig. 3.3 Posiciones del asiento cinámico. Prueba de repetibilidad de punto.

La primera posición para el asiento cinámico debe encontrarse en un radio respecto a la posición del brazo dentro del 20% de su longitud, centrado respecto a este. La segunda posición se elegirá dentro de un anillo entre el 20 y el 80% de la longitud del brazo, fijando la última posición en la zona restante.

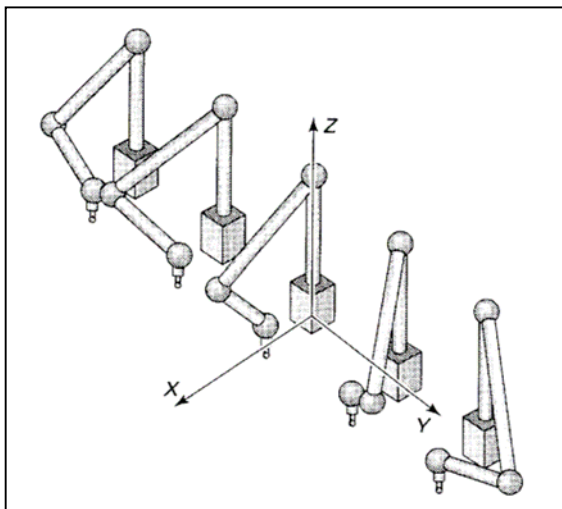


Fig. 3.4 Orientaciones de las articulaciones.

Los procedimientos normalizados recomiendan diez posiciones del brazo en cada uno de los tres puntos, buscando la máxima variación en sus articulaciones.

Repitiendo las cinco posiciones de la figura en dos ocasiones.

Por ello, es recomendable que después de capturar cada punto, el palpador se retire del asiento y se vuelva a posicionar antes de la captura del siguiente punto en una orientación diferente, intentando mantener en lo posible constante la fuerza de palpado.

Con los datos obtenidos en las tres posiciones del asiento cinámico, equivalente en el caso de esfera patrón, debe calcularse la desviación de los puntos medidos con respecto a la media de cada uno de los diez puntos capturados para cada posición del asiento, que representará el punto X, Y, Z nominal. Esta desviación se obtendrá calculando la distancia euclídea de cada punto a la media en la posición correspondiente. Además, se obtendrá la desviación estándar de la distribución de

distancias para cada uno de los tres puntos considerados. Con esto, el ensayo concluirá con la obtención del valor máximo de distancia ($\delta_{\text{máx.}}$) y de la desviación (σ).

$$\delta_i = \sqrt{(X_i - X_a)^2 + (Y_i - Y_a)^2 + (Z_i - Z_a)^2}$$

where
 X_i, Y_i, Z_i = measured coordinates
 X_a, Y_a, Z_a = average coordinates

Fig. 3.5 Ecuación de distancia máxima.

$$2s_{SPAT} = 2 \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n-1)}}$$

where
 n = number of measurements (in this case, $n = 10$)

Fig. 3.6 Ecuación de desviación máxima.

Como resultado final de la prueba es habitual considerar el valor de distancia máximo y el valor 2σ de la distribución de distancias correspondiente a la posición del asiento que ha producido ese valor de distancia. Ambos deberán encontrarse por debajo del límite fijado por el fabricante o por el contrato de compraventa del equipo.

Utilizando el asiento cinemático FARO colocado sobre el soporte de precisión KOBA a una altura de 700mm, fijamos las tres posiciones, correspondientes a los tres puntos de medida, a 220mm, 700mm y 1220mm del brazo de medición respectivamente.

A continuación se refleja un resumen de los resultados obtenidos para estas posiciones de medición:

• POSICION 1 (0%-20%, 220mm)

| POS1 | Xi | Yi | Zi | Di | Di2 |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------|--------|
| 1 | -135,6831 | -181,5511 | 178,3799 | 0,0756 | 0,0057 |
| 2 | -135,7342 | -181,583 | 178,3076 | 0,0931 | 0,0086 |
| 3 | -135,709 | -181,5619 | 178,318 | 0,0860 | 0,0074 |
| 4 | -135,7508 | -181,534 | 178,3708 | 0,0149 | 0,0002 |
| 5 | -135,7529 | -181,544 | 178,3358 | 0,0494 | 0,0024 |
| 6 | -135,7493 | -181,5408 | 178,4196 | 0,0365 | 0,0013 |
| 7 | -135,7815 | -181,5294 | 178,4191 | 0,0429 | 0,0018 |
| 8 | -135,7441 | -181,5493 | 178,344 | 0,0445 | 0,0019 |
| 9 | -135,8178 | -181,4982 | 178,4855 | 0,1237 | 0,0153 |
| 10 | -135,8467 | -181,4619 | 178,4629 | 0,1401 | 0,0196 |
| Promedio | -135,7569 | -181,5353 | 178,3843 | - | - |
| δ_{\max} | | | | 0,1401 | - |
| $2\sigma_{\text{spat}}$ | | | | | 0,1694 |

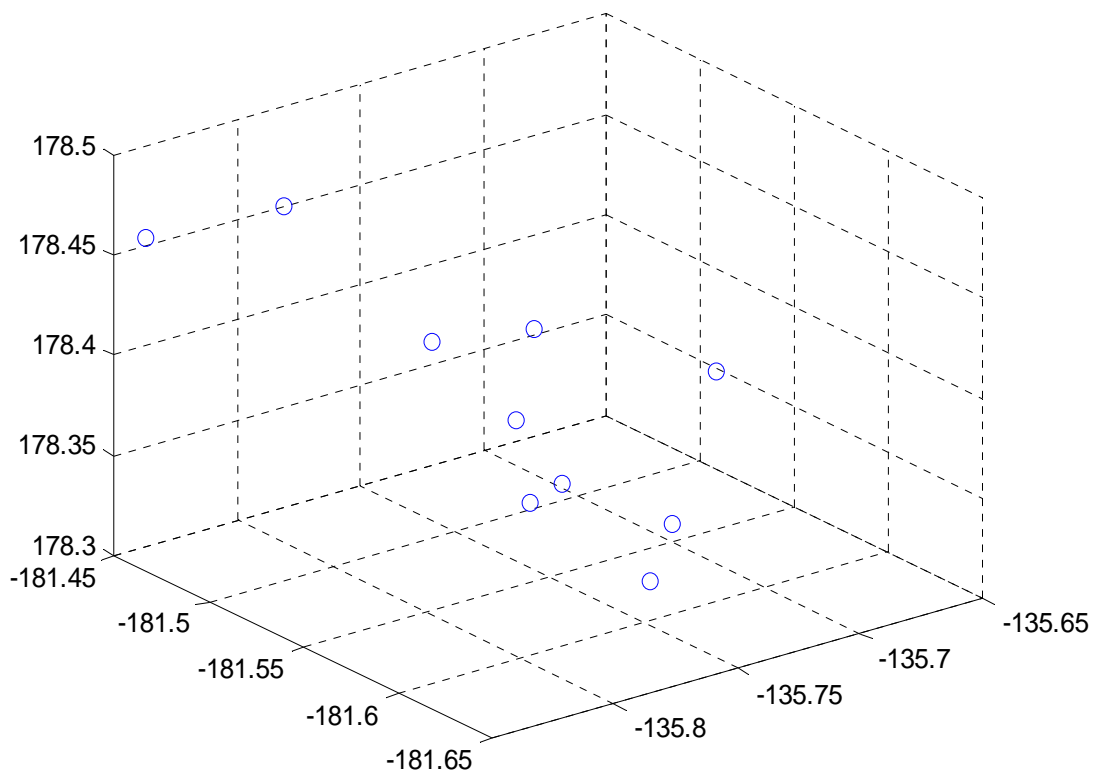


Fig. 3.7 Resultados POSICION 1. Prueba de repetibilidad de punto.

• POSICION 2 (20%-80%, 700mm)

| POS2 | Xi | Yi | Zi | Di | Di2 |
|-------------------------|----------|------------|-----------|--------|--------|
| 1 | -62,4416 | -184,0884 | -707,487 | 0,0773 | 0,0059 |
| 2 | -62,4136 | -184,0977 | -707,4807 | 0,0575 | 0,0033 |
| 3 | -62,3595 | -184,0815 | -707,4892 | 0,0199 | 0,0003 |
| 4 | -62,353 | -184,0437 | -707,5139 | 0,0335 | 0,0011 |
| 5 | -62,3441 | -184,0134 | -707,5219 | 0,0634 | 0,0040 |
| 6 | -62,4188 | -184,0817 | -707,4632 | 0,0607 | 0,0036 |
| 7 | -62,3937 | -184,1042 | -707,4587 | 0,0581 | 0,0033 |
| 8 | -62,3353 | -184,0759 | -707,4909 | 0,0352 | 0,0012 |
| 9 | -62,31 | -184,0361 | -707,505 | 0,0659 | 0,0043 |
| 10 | -62,3144 | -184,0158 | -707,5093 | 0,0743 | 0,0055 |
| Promedio | -62,3684 | -184,06384 | -707,4919 | - | - |
| δ_{\max} | | | | 0,0773 | - |
| $2\sigma_{\text{spat}}$ | | | | | 0,1211 |

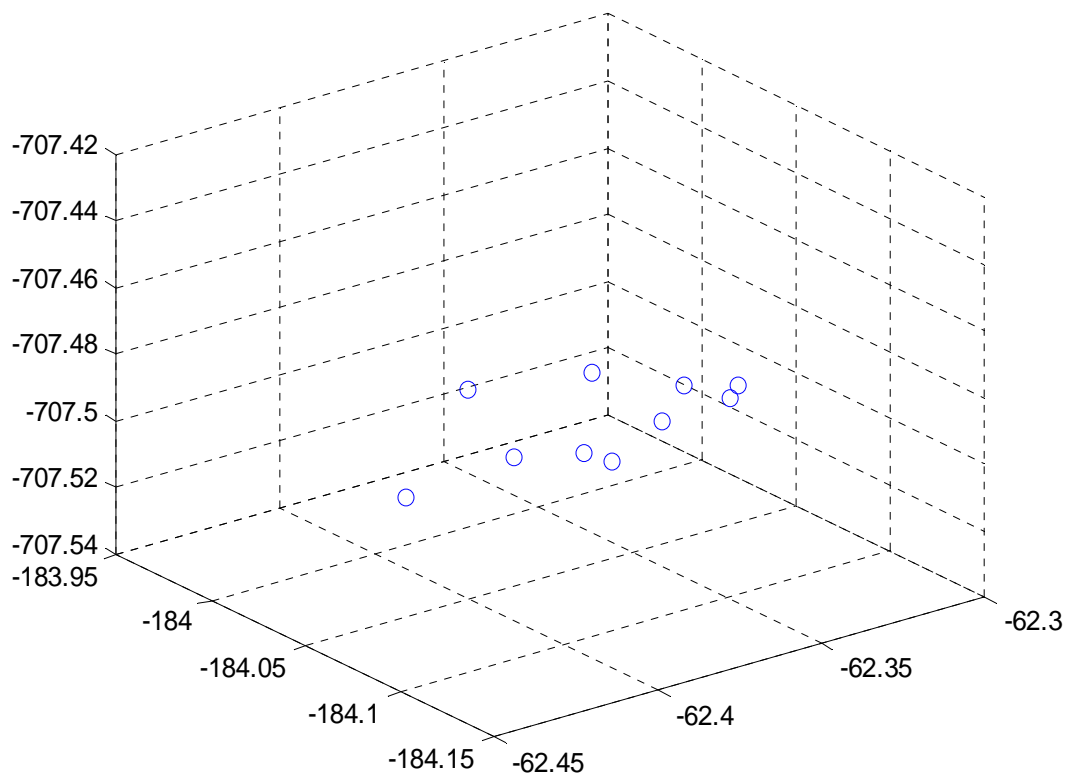


Fig. 3.8 Resultados POSICION 2. Prueba de repetibilidad de punto.

• POSICION 3 (80%-100%, 1220mm)

| POS3 | Xi | Yi | Zi | Di | Di2 |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|--------|--------|
| 1 | 1157,5236 | -182,6025 | 394,321 | 0,1919 | 0,0368 |
| 2 | 1157,5013 | -182,5865 | 394,4092 | 0,1003 | 0,0100 |
| 3 | 1157,4773 | -182,5885 | 394,4633 | 0,0523 | 0,0027 |
| 4 | 1157,4644 | -182,5189 | 394,5375 | 0,0636 | 0,0040 |
| 5 | 1157,4613 | -182,5798 | 394,507 | 0,0363 | 0,0013 |
| 6 | 1157,5222 | -182,5639 | 394,4976 | 0,0290 | 0,0008 |
| 7 | 1157,5222 | -182,5385 | 394,5289 | 0,0444 | 0,0019 |
| 8 | 1157,5011 | -182,5855 | 394,5691 | 0,0652 | 0,0042 |
| 9 | 1157,4879 | -182,5647 | 394,6082 | 0,1012 | 0,0102 |
| 10 | 1157,4872 | -182,5306 | 394,6303 | 0,1282 | 0,0164 |
| Promedio | 1157,4948 | -182,5659 | 394,5072 | - | - |
| δ_{\max} | | | | 0,1919 | - |
| $2\sigma_{\text{spat}}$ | | | | | 0,1986 |

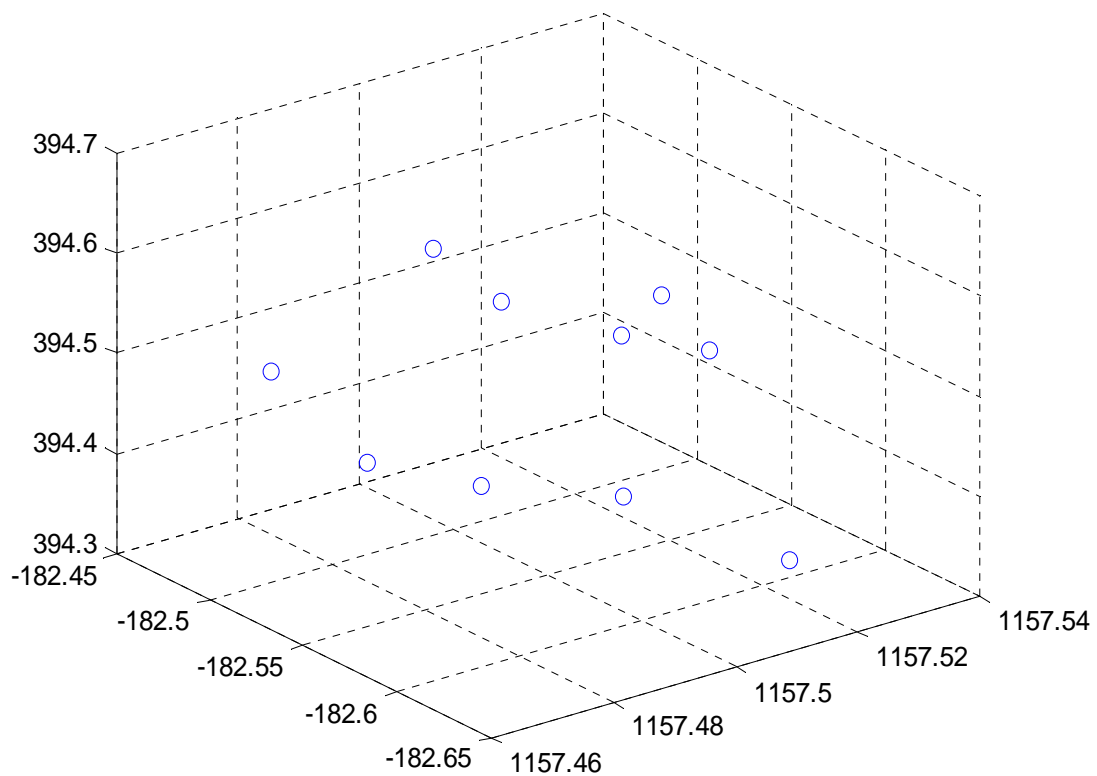


Fig. 3.9 Resultados POSICION 3. Prueba de repetibilidad de punto.

3.1.3 Prueba de precisión longitudinal volumétrica (Volumetric Performace Test):

El ensayo consiste en la medición de distancias materializadas por un artefacto patrón calibrado, dispuesto en distintas orientaciones del volumen de trabajo. Los patrones que materializan las distancias pueden ser de distinta forma y naturaleza siendo los más habituales los patrones escalonados y las barras de esferas. En el caso de barras de esferas, son necesarios patrones que materialicen dos distancias, una correspondiente aproximadamente al 60% de la longitud del brazo y la otra entorno al 130% de esa longitud. En el caso más general, los patrones de bolas materializan una distancia entre centros de esferas, que deberá estar calibrada.

El objetivo de esta prueba es comprobar el funcionamiento del brazo en todo su volumen, por lo que se divide el espacio de trabajo del brazo, que será una esfera de diámetro dos veces la longitud del brazo a partir del eje de su primera articulación, en dos hemisferios separados por el plano medio a la altura de la base del brazo.

Cada uno de estos hemisferios se divide en cuatro cuadrantes, de modo que el espacio total de trabajo del brazo queda dividido en ocho octantes. Según la referencia indicada por el fabricante para establecer la parte frontal del brazo, se establece la numeración de estos octantes.

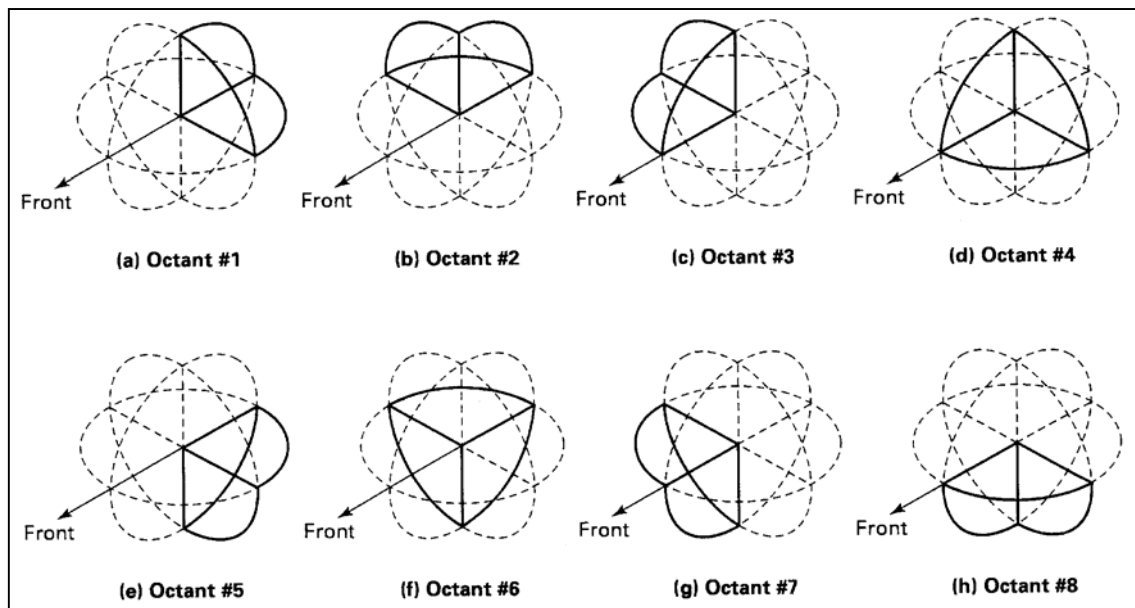


Fig. 3.10 Esquema y numeración de los octantes.

Las barras de bolas deben ser posicionadas en horizontal, vertical y a 45° con respecto al brazo. La forma de determinar una posición para el ensayo vendrá dada por la especificación del tipo de patrón, largo o corto, los octantes a los que afecta, la inclinación, la distancia a la base del brazo y la dirección. La distancia a la base del brazo se especifica como cerca o lejos, entendiendo por cerca, las posiciones en las que la barra se encuentra a una distancia de la base menor que la mitad de la longitud total del brazo, y lejos, las posiciones más allá de la mitad de la longitud del brazo.

Con respecto a la dirección, las posiciones horizontales y a 45° quedarán completamente determinadas indicando si deben ser posicionadas radial o tangencialmente al brazo.

| Posición | Longitud | Octantes | Inclinación | Distancia | Dirección |
|----------|----------|----------|-------------|-----------|------------|
| 1 | Corta | 8 | Horizontal | Cerca | Radial |
| 2 | Corta | 5 | Horizontal | Cerca | Radial |
| 3 | Corta | 1-2 | Horizontal | Lejos | Tangencial |
| 4 | Corta | 4-7 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 5 | Corta | 7-3 | Vertical | Lejos | Tangencial |
| 6 | Corta | 1-5 | Vertical | Lejos | Tangencial |
| 7 | Corta | 2 | Horizontal | Cerca | Radial |
| 8 | Larga | 2-8 | 45° | Cerca | Tangencial |
| 9 | Corta | 3 | Horizontal | Cerca | Radial |
| 10 | Larga | 1-7 | 45° | Cerca | Tangencial |
| 11 | Corta | 1-6 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 12 | Corta | 6-3 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 13 | Corta | 5-4 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 14 | Corta | 3-8 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 15 | Corta | 5-2 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 16 | Corta | 1-8 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 17 | Corta | 2-7 | 45° | Lejos | Tangencial |
| 18 | Larga | 3-4 | Horizontal | Cerca | Tangencial |
| 19 | Larga | 2-6 | Vertical | Lejos | Tangencial |
| 20 | Larga | 4-8 | Vertical | Cerca | Tangencial |

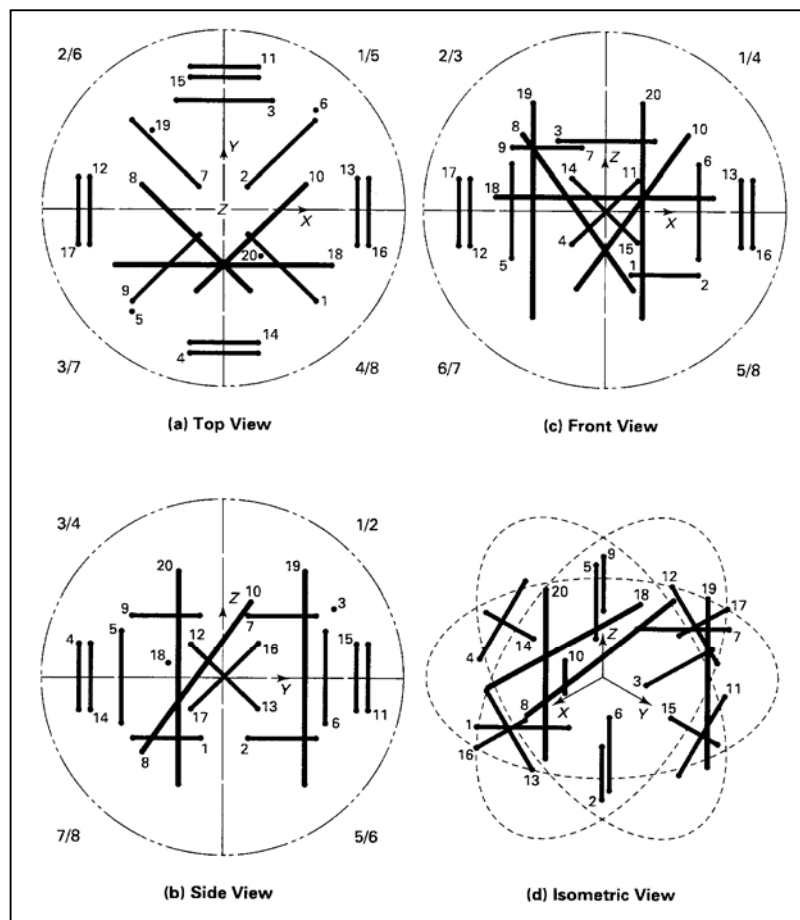


Fig. 3.11 Posiciones de la barra patrón. Ensayo de precisión volumétrica.

De esta forma, el procedimiento normalizado establece 20 posiciones de la barra en todo el volumen del brazo, dos en posición vertical, diez en horizontal y ocho a 45°. Para cada una de estas posiciones será necesario medir la distancia materializada por el patrón, de forma que se capten cinco puntos por esfera y se evalúe la distancia entre ellas.

Para cada una de las posiciones medidas se obtendrá el error de medida en distancias, es decir, la diferencia entre la distancia medida y la calibrada.

Como resultado final de esta prueba se obtendrán tres parámetros:

- La máxima desviación obtenida para todas las posiciones.
- El rango de estas desviaciones.
- Un valor que da idea de la desviación media, que vendrá dado por dos veces el valor cuadrático medio de las desviaciones para todas las posiciones consideradas.

$$D_i = L_i - L_{cal}$$

Fig. 3.12 Ecuación de desviación. Ensayo de precisión volumétrica.

$$2RMS = 2 \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}$$

Fig. 3.13 Ecuación de desviación media. Ensayo de precisión volumétrica.

Para reproducir el test de precisión volumétrica se ha optado por reflejar en el suelo los cuatro octantes y así hacer más visual el posicionado de las longitudes a medir.

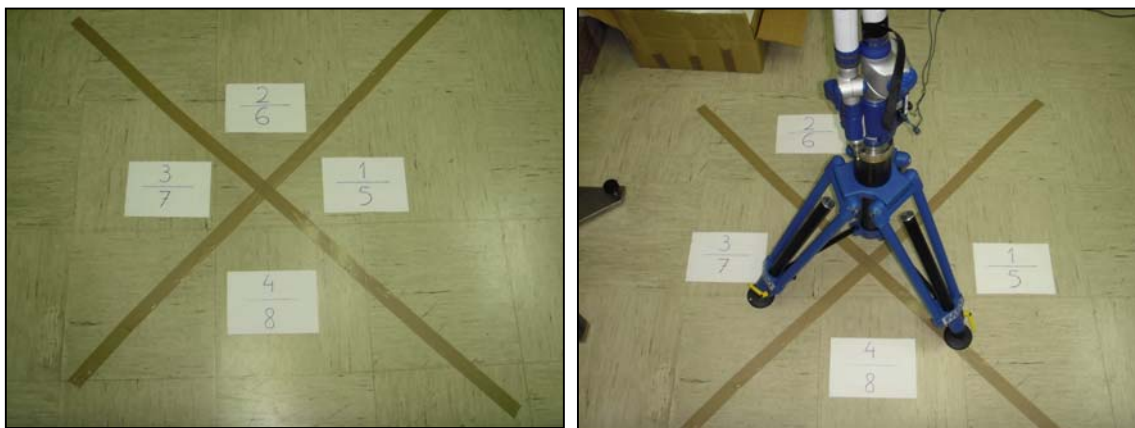


Fig. 3.14 Representación visual de los octantes. Ensayo de precisión volumétrica.

Las longitudes a medir, las distancias donde colocarlas se han fijado en la barra patrón de la siguiente manera:

- **Longitud Larga:** Esfera15-Esfera1
Distancia Teórica: 1400mm
Distancia Calibrada: 1400,289mm
- **Longitud Corta:** Esfera12-Esfera4
Distancia Teórica: 800mm
Distancia Calibrada: 800,1512mm

El posicionado de la barra patrón para la reproducción de las posiciones descritas en el test se ha hecho acorde a los octantes reflejados en el suelo y a las siguientes alturas.

- **Posición 0:** Barra a 770mm de altura
Longitudes 4, 5, 6, 8,10-20
- **Posición 1:** Barra a 470mm de altura
Longitudes 1 y 2
- **Posición 2:** Barra a 1230mm de altura
Longitudes 3,7 y 9

Tras obtener las posiciones de los puntos extremos de las longitudes, y calcular las longitudes mediante mínimos cuadrados por medio de MATLAB, estos son los resultados obtenidos:

| POSICION | Li | Lcal | Di | Di^2 |
|--------------------|-----------|----------|---------|-------------|
| 1 | 800,1461 | 800,1512 | -0,0050 | 2,55549E-05 |
| 2 | 800,1729 | 800,1512 | 0,0217 | 0,0004 |
| 3 | 800,1265 | 800,1512 | -0,0246 | 0,0006 |
| 4 | 800,1026 | 800,1512 | -0,0485 | 0,0023 |
| 5 | 1400,2221 | 1400,289 | -0,0668 | 0,0044 |
| 6 | 1400,1488 | 1400,289 | -0,1401 | 0,0196 |
| 7 | 800,1251 | 800,1512 | -0,0260 | 0,0006 |
| 8 | 1400,1317 | 1400,289 | -0,1572 | 0,0247 |
| 9 | 800,1231 | 800,1512 | -0,0280 | 0,0007 |
| 10 | 1400,0344 | 1400,289 | -0,2545 | 0,0647 |
| 11 | 800,1249 | 800,1512 | -0,0263 | 0,0006 |
| 12 | 800,1389 | 800,1512 | -0,0122 | 0,0001 |
| 13 | 800,0682 | 800,1512 | -0,0829 | 0,0068 |
| 14 | 800,0630 | 800,1512 | -0,0881 | 0,0077 |
| 15 | 800,1882 | 800,1512 | 0,0370 | 0,0013 |
| 16 | 800,0634 | 800,1512 | -0,0877 | 0,0076 |
| 17 | 800,0315 | 800,1512 | -0,1196 | 0,0143 |
| 18 | 1400,1012 | 1400,289 | -0,1877 | 0,0352 |
| 19 | 1400,1922 | 1400,289 | -0,0967 | 0,0093 |
| 20 | 1400,2108 | 1400,289 | -0,0781 | 0,0061 |
| DESVIACION MAXIMA= | | | 0,2545 | ... |
| RANGO (Dmax-Dmin)= | | | 0,2915 | ... |
| 2RMS= | | | | 0,2040 |

Fig. 3.15 Datos obtenidos y calculados. Ensayo de precisión volumétrica.

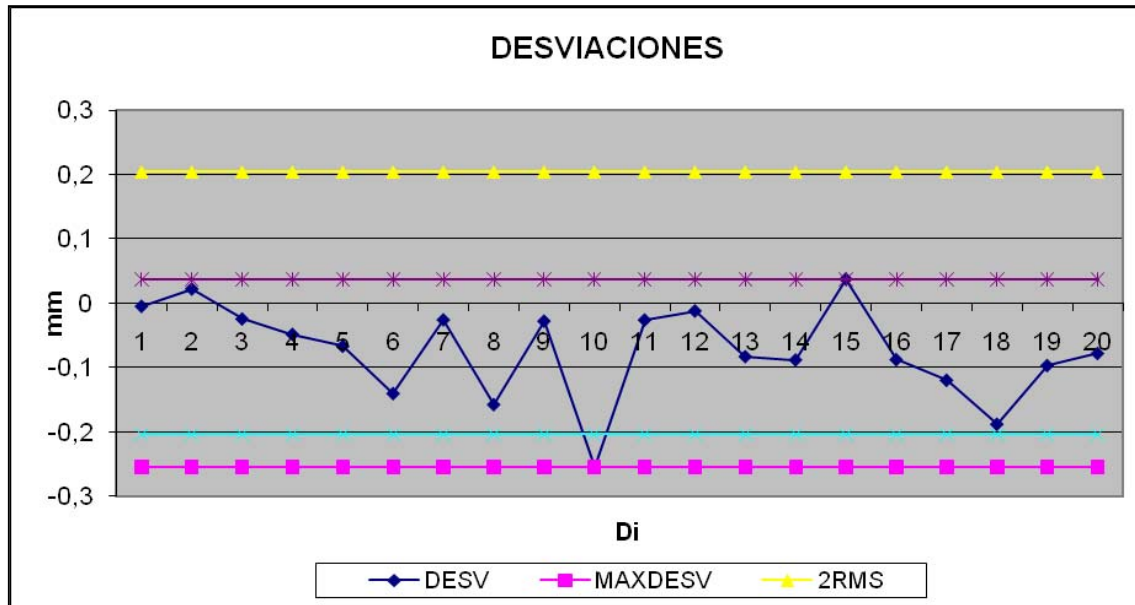


Fig. 3.16 Representación de valores calculados. Ensayo de precisión volumétrica.

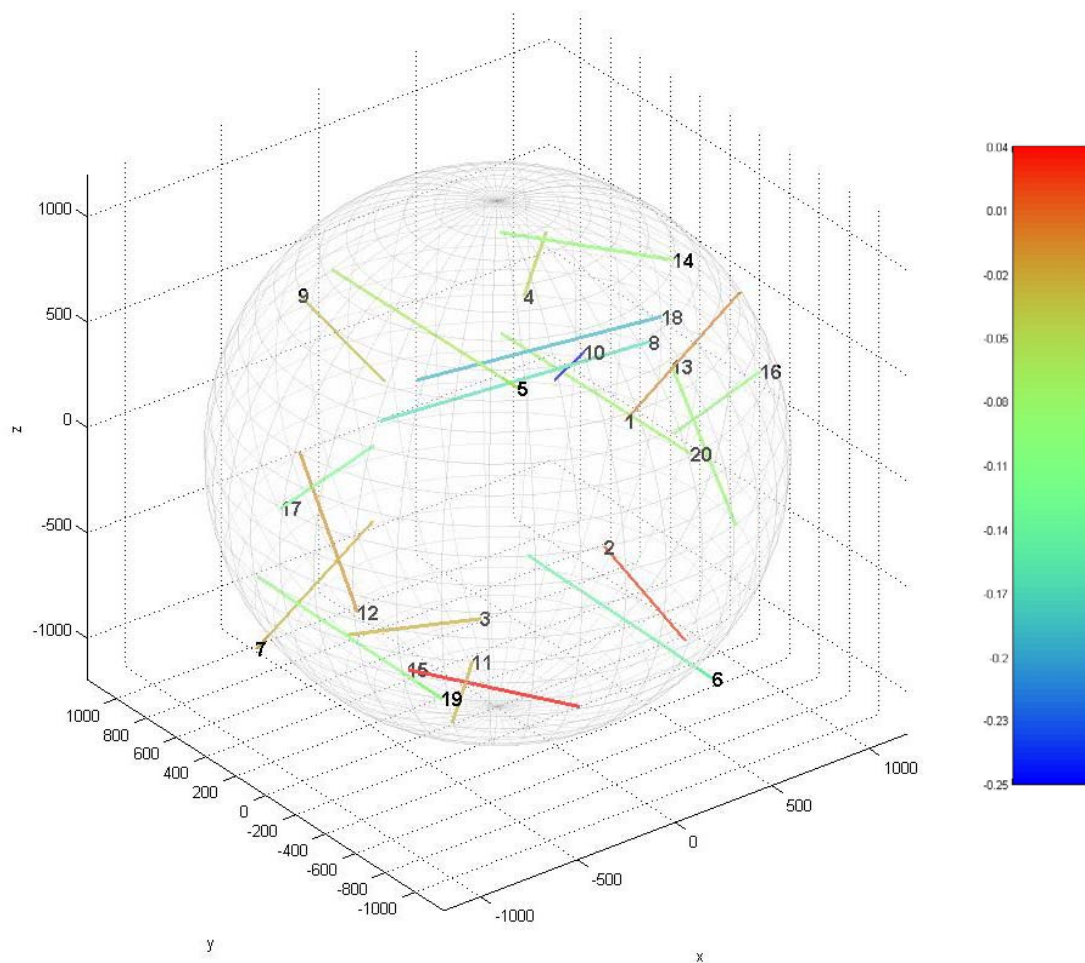


Fig. 3.17 Representación gráfica de las longitudes medidas. Ensayo de precisión volumétrica

3.2 Recomendación VDI 2617. Parte 9. Guión de medición.

La directriz “VDI/VDE 2617”, es desarrollada por la “Verein Deutscher Ingenieure / Verband Der Elektrotechnik” (Asociación de ingenieros alemanes / Asociación de Electrotécnica).

El contenido de esta directriz ha sido desarrollado en estricta conformidad con los requerimientos y recomendaciones de la directriz “VDI 1000”.

La directriz “VDI/VDE 2617” especifica las características que sirven para describir la precisión de las máquinas de medición por coordenadas (CMMs) y describe los procedimientos para el control de estas características.

La directriz describe procedimientos para evaluar brazos articulados de medición por coordenadas por palpadores de contacto. Se puede aplicar en:

- Aceptación de pruebas que permitan verificar la conformidad de la máquina de medición por coordenadas y su palpador, con las especificaciones del fabricante.
- Pruebas de verificación adicional realizadas por el usuario para comprobaciones periódicas del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador.
- Comprobaciones provisionales realizadas por el usuario para la vigilancia del brazo articulado de medición por coordenadas y su palpador entre pruebas de verificación.
- La prueba es aplicable a brazos articulados de medición por coordenadas que tengan al menos cuatro ejes, no contabilizando ningún eje redundante.

Esta recomendación propone la realización de diferentes pruebas para llevar a cabo la evaluación de las características metrológicas de los brazos de medida:

- **Prueba de error de palpado.**
- **Prueba de error de indicación del tamaño de la medición.**
 - Volumen de medición completo.
 - Volúmenes de medición parciales.

3.2.1 Prueba de error de palpado (Probing Error Test):

Este test está basado en su correspondiente para MMC's descrito en la norma DIN EN ISO 10360-5 y consiste en verificar que las desviaciones que se producen en la medición, estén por debajo de unos errores máximos de palpado MPE o MPL:

- MPE_{PS} para desviaciones en la medición del tamaño S
- MPE_{PF} para desviaciones en la medición de la forma F
- MPL_{PL} para desviaciones en la medición de la ubicación L

Los valores de dichas desviaciones se calculan durante el proceso de medición de una esfera calibrada fuertemente anclada en tres posiciones distintas del volumen de medición del brazo articulado que se quiere verificar. En relación con el eje vertical principal y el nivel cero de la máquina, estas posiciones tendrán que, si es posible, encontrarse en tres sectores de 120° y en los rangos siguientes:

- A una distancia al brazo menor del 30% y una altura de aproximadamente el -20% de la longitud del brazo útil.
- A una distancia al brazo de entre el 30% y el 70% y una altura de aproximadamente el 0% de la longitud del brazo útil
- A una distancia al brazo superior al 70% y una altura de aproximadamente el 50% de la longitud del brazo útil

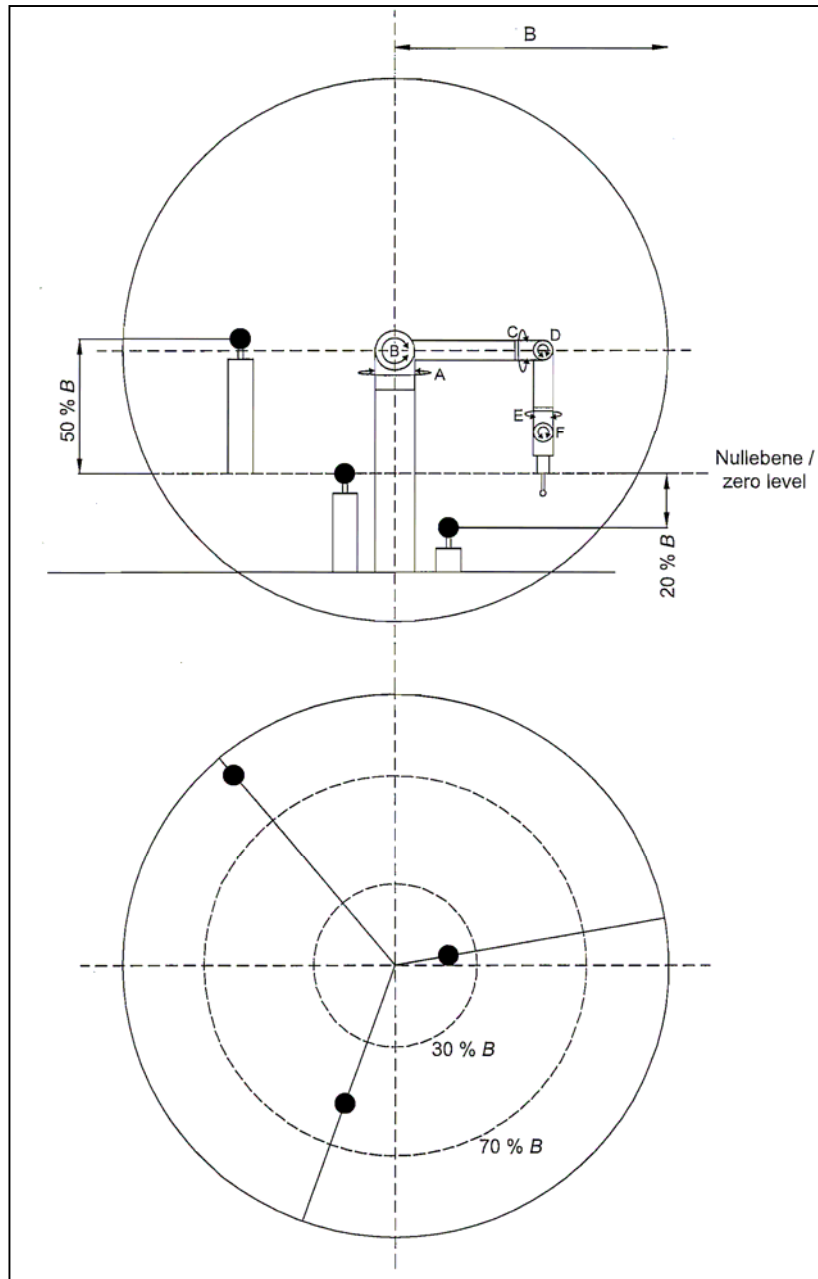


Fig. 3.18 Representación de las posiciones de medición. Prueba de error de palpado

En cada una de las tres posiciones, se palpan cinco puntos distribuidos sobre un hemisferio de la esfera patrón. Si es posible, un punto debe ser tomado en el polo en la dirección de palpado, y cuatro puntos deben ser tomados distribuidos equidistantemente a lo largo del ecuador a fin de permitir medidas por contacto libre. Esta medición de cinco puntos, se repite cinco veces usando diferentes orientaciones de palpado en cada caso. Las orientaciones de palpado, de ser posible, deben coincidir aproximadamente con las direcciones x , y , z del sistema de coordenadas (similar a una configuración de palpado en estrella en una máquina de medición por coordenadas). Por lo tanto, se miden 25 puntos sobre la esfera patrón, en cada posición de la prueba, es decir, un total de 75 puntos de medida.

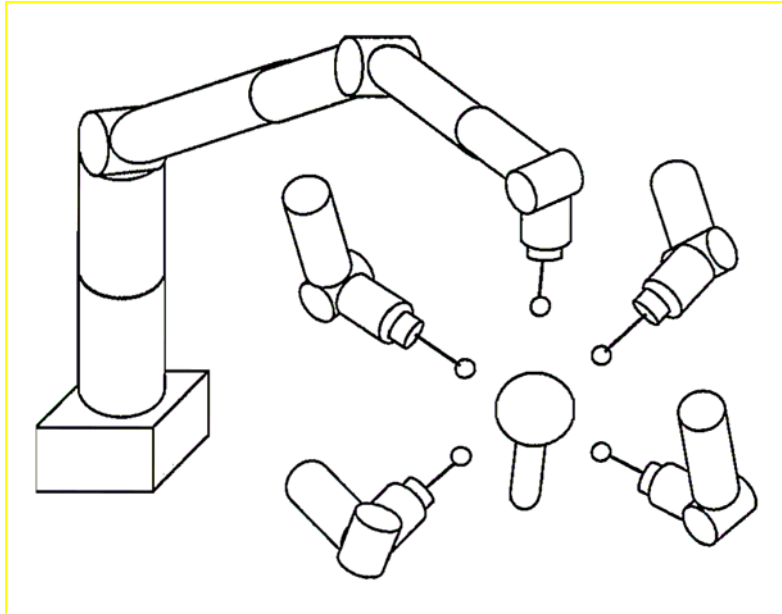


Fig. 3.19 Orientaciones de palpado. Prueba de error de palpado

En nuestra aplicación del test hemos fijado el cero del brazo de medición a 470mm. tomando como posiciones y esferas las siguientes:

- POSICION 1:
Altura: -270mm
Distancia: 300mm
Esfera 14: Diámetro calibrado 21,9986mm
- POSICION 2:
Altura: 770mm
Distancia: 700mm
Esfera 10: Diámetro calibrado 22,0010mm
- POSICION 3:
Altura: 1065mm
Distancia: 1230mm
Esfera 11: Diámetro calibrado 21,9997mm.

3.2.1.1 Error de palpado de posición de la esfera.

De cada grupo de cinco puntos de medición, se calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados, obteniendo así sus centros. En nuestro caso, dado la cantidad de datos y por tanto la cantidad de cálculos, nos hemos ayudado de funciones de MATLAB para el cálculo de estos centros. Para cada posición de la prueba, se obtienen cinco centros de esfera que tienen coordenadas x, y, z. Se calcula la distancia máxima entre dos de estos cinco centros. Finalmente, la mayor distancia de las tres máximas distancias obtenidas (una por posición) es el error de palpado, PL, de posición de la esfera.

Nota: Para cada posición de la prueba, se obtienen diez distancias entre los centros, es decir, 30 en total, la mayor de las cuales es PL

Las máximas desviaciones entre centros obtenidas son:

- PL Posición 1: **0,1719mm**
- PL Posición 2: 0,0685mm
- PL Posición 3: 0,1625mm

3.2.1.2 Error de palpado de tamaño de la esfera.

De los 25 puntos medidos por cada posición de la prueba, se calcula la regresión gaussiana de la esfera utilizando el método de mínimos cuadrados. Para cada una de las tres posiciones de la esfera, se determina la desviación del diámetro de la esfera comparándolo con el valor de calibración de la esfera. El mayor valor absoluto de los errores de diámetro para las tres posiciones de la esfera, es el error de palpado, PS, de tamaño.

Las máximas desviaciones de tamaño obtenidas con respecto al calibrado son:

- PS Posición 1: 0,023mm
- PS Posición 2: **0,093mm**
- PS Posición 3: 0,049mm

3.2.1.3 Error de palpado de forma de la esfera.

De acuerdo a la regresión calculada para el error de palpado de tamaño, se calcula para cada posición de la prueba el rango de radios de todos los 25 puntos de medida, es

decir, las distancias desde el centro común. El mayor de los rangos de los radios de las tres posiciones de la prueba es el error de palpado, PF, de forma.

Las máximas desviaciones de radio obtenidas son:

- PF Posición 1: 0,0375mm
- PF Posición 2: **0,0792mm**
- PF Posición 3: 0,0294mm

3.2.2 Prueba de error de indicación del tamaño de la medición:

Para permitir una evaluación de la precisión geométrica, la máquina de medición de coordenadas de brazo articulado se verifica por su capacidad de realizar mediciones de tamaño sin llegar al error máximo permisible de indicación, MPE_E . La evaluación se lleva a cabo comparando los valores de calibrado de la barra patrón de esferas con los valores medidos. Similar al procedimiento aplicado para las máquinas de medición por coordenadas, la barra patrón de esferas se dispone en varias posiciones y orientaciones.

Los patrones utilizados son unidimensionales tales como una pila de bloques patrón, bloques patrón escalonados, barra de esferas, banda de esferas o bandas perforadas. Los patrones deben permitir determinar al menos cinco longitudes a lo largo de una línea de medida. Las longitudes del patrón medido deben estar calibradas.

3.2.2.1 Prueba de error en la medición de longitudes dentro del volumen de medición completo.

La mayor longitud de tamaño del patrón será al menos igual al 66% de la capacidad de medición útil del brazo articulado. A falta de un patrón lo suficientemente largo, se permite realizar mediciones consecutivas desplazando un patrón de menor tamaño a lo largo de la línea de medición.

El patrón se medirá (de conformidad con la norma DIN EN ISO 10360-2) en al menos siete disposiciones (posición y dirección) que pueden ser elegidas arbitrariamente por el usuario. A diferencia de las máquinas de medición por coordenadas, un brazo articulado permite llegar a un punto en el volumen de medición con una multitud de diferentes orientaciones de brazo, lo que hace más difícil captar la acción combinada de las influencias de error. Es, por tanto, por lo que se recomienda el uso de las siguientes disposiciones del patrón en el volumen de medición del brazo articulado.

- Los puntos finales de la mayor longitud utilizada en la prueba (por lo menos el 66% del rango de medición usado), si es posible, se encuentran dentro de una envoltura esférica que conforman el 70% al 100% de la capacidad de medida.
- De ser posible, el patrón se dispone en tres sectores de aproximadamente 120° cada uno del volumen de medida. Es posible reubicar o girar el brazo articulado en lugar de la barra patrón.
- En uno de los sectores, si es posible, la barra patrón se dispone en una posición horizontal y en posiciones oblicuas cruzadas y en cada uno de los otros dos sectores, una posición horizontal y sólo una posición oblicua. Estas dos últimas disposiciones oblicuas, de ser posible, están inclinadas en direcciones opuestas, cuando se ve desde fuera del volumen de medida en dirección radial.

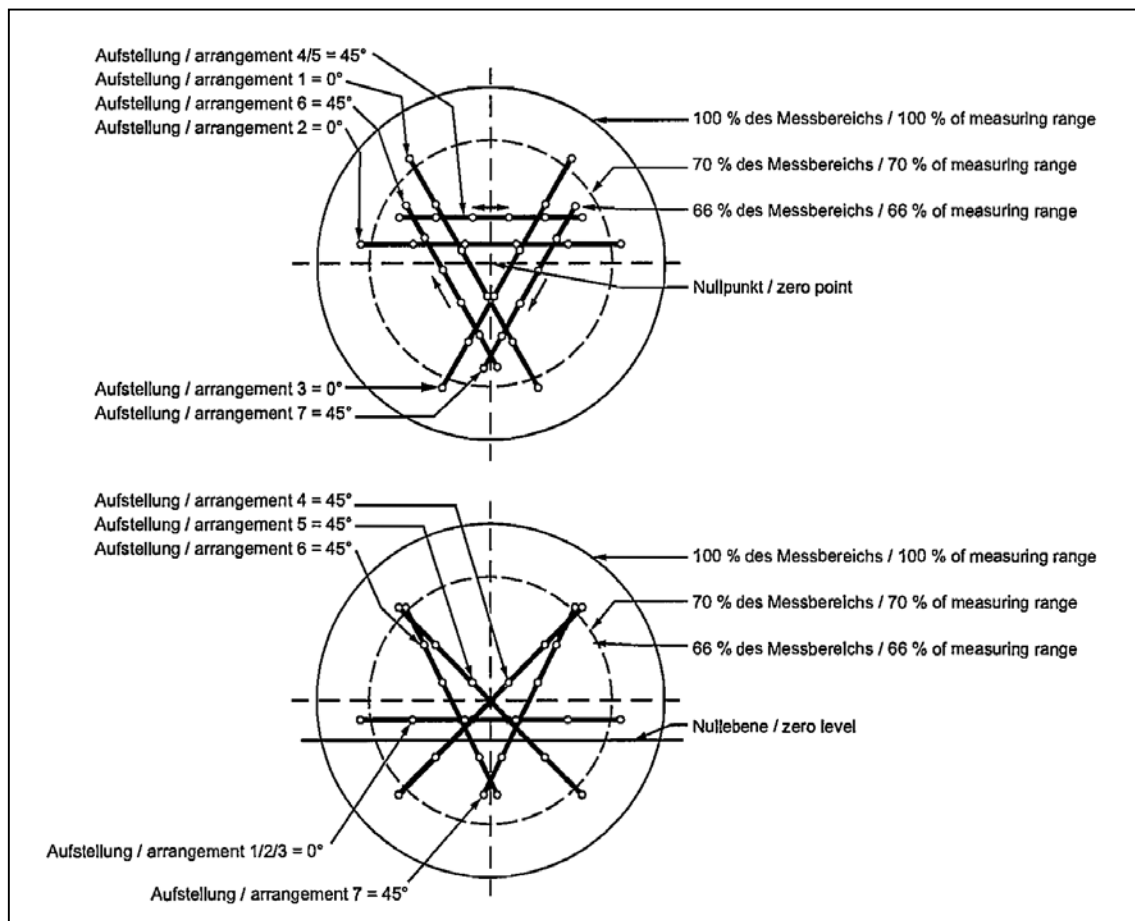


Fig. 3.20 Disposición del patrón. Prueba de error en la medición de longitudes en el volumen de medición completo

En la selección de las líneas de medición, se ha tenido en cuenta que el error de influencias en las mediciones dependen en gran medida de la posición de los distintos segmentos del brazo articulado uno respecto al otro, de la inclinación de la respectiva línea de medida y de la de distancia medida desde el punto cero de la máquina.

Para cada disposición de la barra patrón, al menos cinco longitudes son medidas, cada una de las cuales, debe ser medida en tres ocasiones. Para cada una de las siete disposiciones de la barra patrón, se obtienen al menos 15 longitudes. El número total de longitudes medidas a lo largo de la prueba no es inferior a 105.

En dos de las tres mediciones, la longitud de la prueba se determinará utilizando las posiciones de los extremos opuestas del eje A del brazo articulado sometido a la prueba. Esto pone de relieve influencias debido a los efectos de histéresis en los errores de indicación para la medición de la longitud

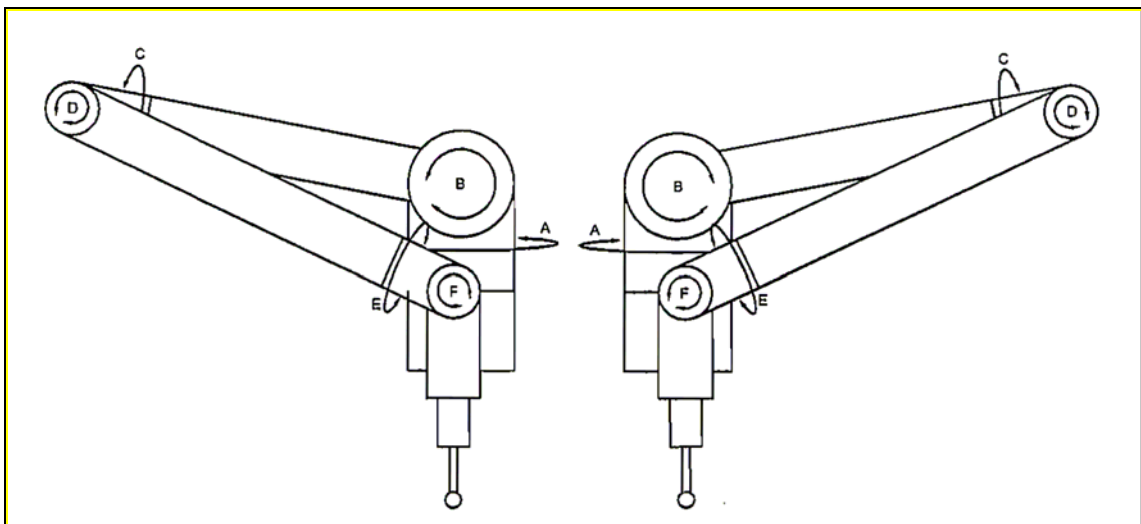


Fig. 3.21 Posiciones opuestas del eje A. Prueba de error en la medición de longitudes en el volumen completo

En el caso de mediciones consecutivas, una vez la primera posición se ha medido, la barra patrón se desplaza por toda su longitud en la dirección de la medición y el primer elemento característico se posiciona aproximadamente en ese punto donde el último estaba situado anteriormente. Las mediciones se ven facilitadas considerablemente por un medio adecuado para cambiar el patrón a lo largo de la línea de medida. Si es posible, las posiciones individuales se superponen en las uniones, ya sea totalmente o por unos pocos milímetros. La barra patrón se mide en tantas posiciones como sea necesario para cubrir aproximadamente el 66% de la capacidad de medición útil. En total, se miden por lo menos cinco longitudes de prueba en cada línea de medida.

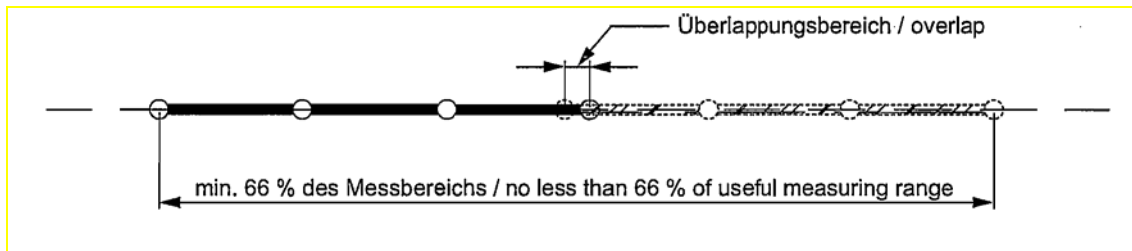


Fig. 3.22 Mediciones consecutivas. Prueba de error en la medición de longitudes en el volumen completo

Para cada medida individual, el error de indicación de la longitud medida, E , se calculará en función de la diferencia entre el valor indicado y el valor de calibrado de la barra patrón de esferas.

Como regla general, las esferas individuales de una barra de esferas no se encuentran en una línea recta ideal. Por tanto, solo se puede evaluar la distancia entre esferas colindantes, en vez de evaluar directamente la distancia espacial entre dos esferas. Entonces, lo que se evalúa es la longitud de una línea poligonal que pasa por todos los centros de esfera intermedios.

Algo similar ocurre en el caso de las medidas consecutivas. Los elementos característicos no se encuentran necesariamente en una línea recta ideal. El error indicado para la medición es, por tanto, calculado a lo largo de varias posiciones y función de la suma de los errores individuales de la indicación para la medición.

Los errores de indicación para la medición, E , junto con sus valores límite, MPE_E , se presentarán en un diagrama de conjunto para todas las disposiciones de la prueba.

3.2.2.2 Prueba de error en la medición de longitudes dentro de volúmenes de medición parciales.

La realización de pruebas de medición de volúmenes parciales se permite sólo donde esté disponible una barra patrón más corta que el 66% del volumen de medición útil, con la barra en posición diagonal.

Este ha sido nuestro caso, donde la barra patrón de la que disponíamos tenía una medida efectiva de 1400mm que suponían menos del 66% del campo de medición del brazo que era 2400mm. Con el fin de no sumar errores intrínsecos al desplazamiento de la barra patrón a la hora de hacer medidas consecutivas y que nada tienen que ver con el correcto funcionamiento del brazo, se ha optado por hacer esta modalidad de test para el cálculo del error de indicación del tamaño de la medición.

En este caso, la barra patrón se debe medir en cada volumen parcial a lo largo de no menos de tres líneas de medida que interseccionan ortogonalmente entre sí. En cualquier caso, se deben incluir las posiciones diagonales.

Para determinar los volúmenes parciales es preciso considerar los siguientes aspectos:

- Los volúmenes parciales individuales deben superponerse.
- La diagonal de un volumen parcial debe ser igual al menos al 40% de la capacidad de medida (correspondiente a 5/8 del 66% de la capacidad de medida).
- El número mínimo de volúmenes parciales es de tres.
- Los volúmenes parciales se distribuyen uniformemente a lo largo de todo el volumen de medida.
- La mayor diagonal del volumen de medida debe estar cubierta en su totalidad por los volúmenes parciales.

Se recomienda dividir el volumen completo de medida en cuatro volúmenes parciales esféricos de igual tamaño, cuyos diámetros sean equivalentes al menos al 40% del volumen de medida y que permita tres disposiciones de medida como se especifica.

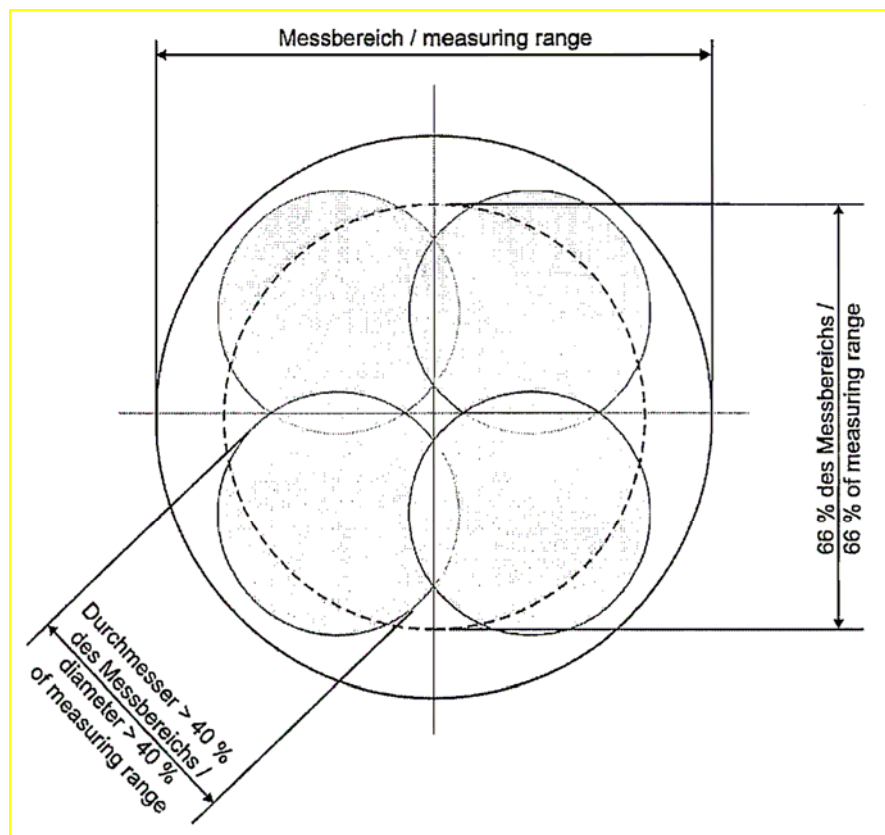


Fig. 3.23. Elección de volúmenes parciales. Prueba de error en la medición de longitudes en volúmenes parciales

En nuestro caso se aprovechó la división hecha en el test de “Error de Palpado” para a partir de ella formar cuatro volúmenes parciales de 1000mm de diámetros dispuestos de la siguiente forma:

- Volumen 1: situado en octantes 1 y 5
- Volumen 2: situado en octantes 2 y 6
- Volumen 3: situado en octantes 3 y 7
- Volumen 4: situado en octantes 4 y 8

Al igual que en el caso de usar el volumen de medida completo, al menos cinco longitudes son medidas para cada disposición de la barra patrón. De nuevo, cada una de las longitudes debe ser medida en tres ocasiones, obteniendo al menos 15 longitudes para cada una de las al menos nueve líneas de medida. El número total de longitudes medidas a lo largo de la prueba, será no inferior a 135.

En dos de las tres mediciones, la longitud de la prueba se determinará utilizando las posiciones de los extremos opuestas del eje A del brazo articulado sometido a la prueba. Esto pone de relieve influencias debido a los efectos de histéresis en los errores de indicación para la medición de la longitud.

Para cada medida individual, el error de indicación de la longitud medida, E , se calculará en función de la diferencia entre el valor indicado y el valor de calibrado de la barra patrón de esferas.

Como ocurría con el cálculo de error en el volumen completo, los errores de indicación para la medición, E , junto con sus valores límite, MPE_E , se presentarán en un diagrama de conjunto para todas las disposiciones de la prueba en los volúmenes parciales.

Tras eliminar unas mediciones que resultaron erróneas debido al movimiento de la barra patrón, este es el resumen de los resultados obtenidos:

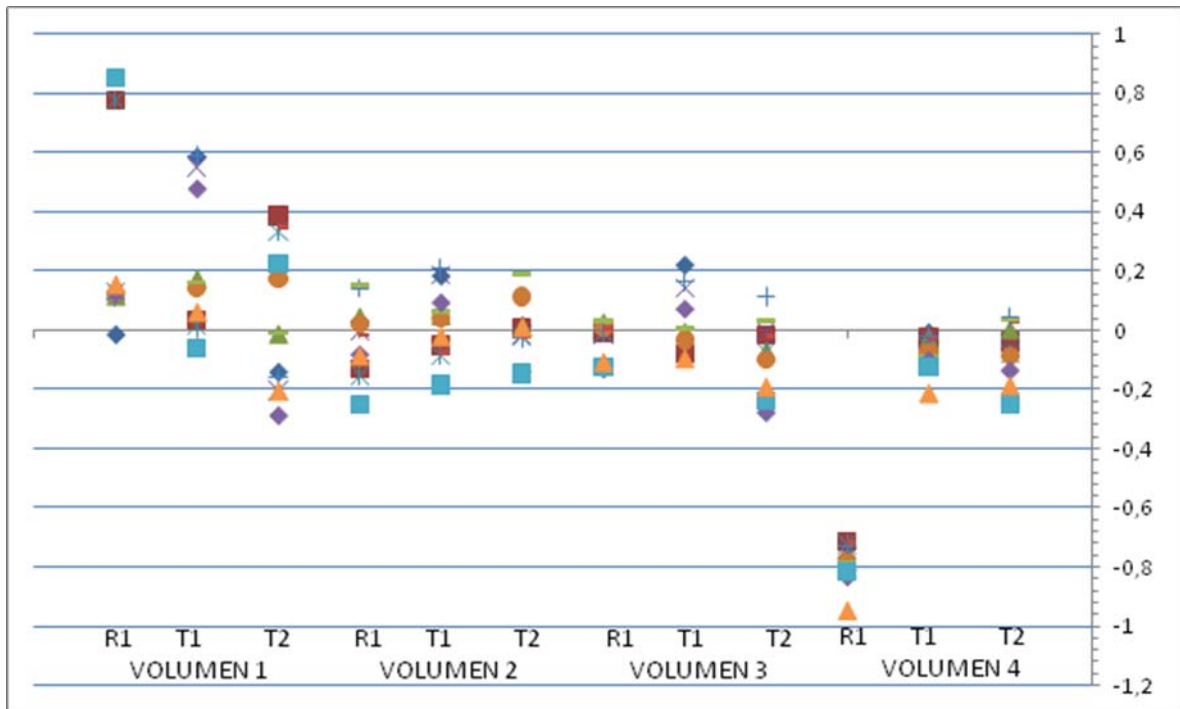


Fig. 3.24. Errores según la posición. Prueba de error en la medición de longitudes en volúmenes parciales

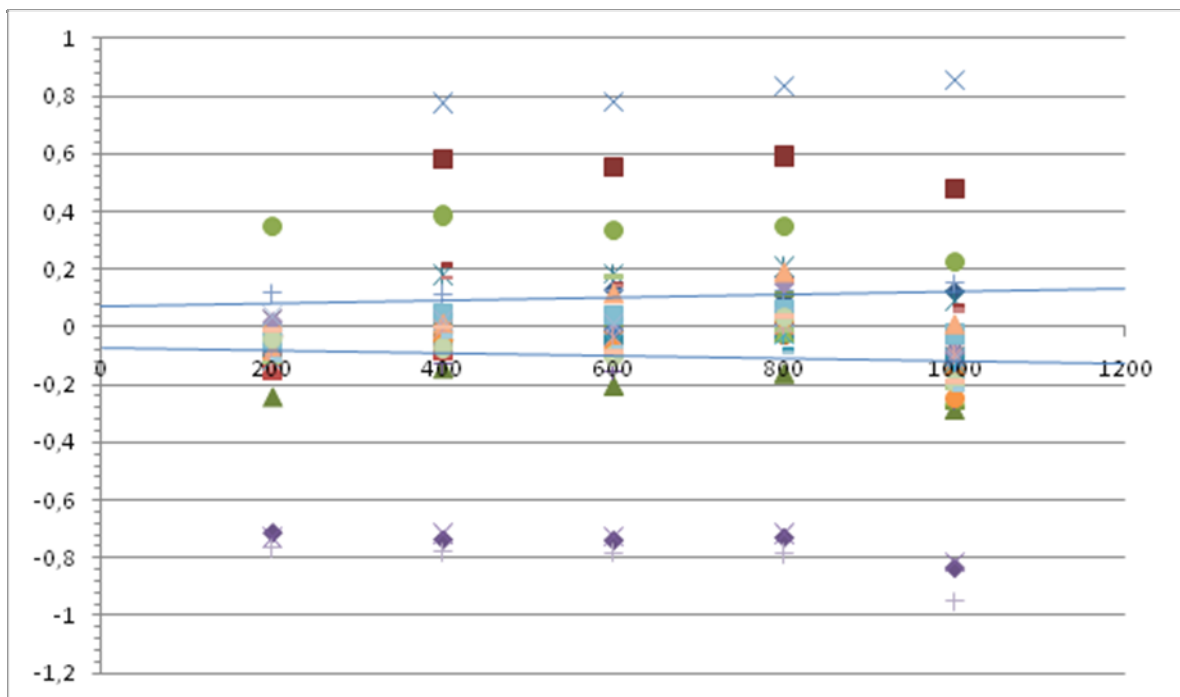


Fig. 3.25. Errores según la longitud. Prueba de error en la medición de longitudes en volúmenes parciales

Capítulo 4. Comparación de resultados.

Tal como se ha podido comprobar en la descripción de los dos procesos de verificación de los brazos de medición, los análisis llevados a cabo, y por tanto los resultados obtenidos, aun conteniendo algunas similitudes, son distintos entre sí. Este aspecto conlleva que sea complicado poder comparar los resultados entre procesos. Sin embargo sí se pueden agrupar los análisis según el objetivo de verificación que pretenden y analizarlos. Los grupos de verificación que se pueden encontrar son:

- **Análisis de errores en la medición de tamaños**
- **Análisis de errores en la medición de posiciones**
- **Análisis de errores en la medición de longitudes**

4.1 Análisis de errores en la medición de tamaños

Con el objetivo de cuantificar el error que comete el brazo de medición ante la medición de tamaños la norma ASME lleva a cabo el “Test de diámetro efectivo” y la recomendación VDI el “Test de error de palpado de tamaño”. Ambos análisis tienen algunas características en común y otras distintas:

| ASME <i>“Test de diámetro efectivo”</i> | VDI <i>“Test de error de palpado de tamaño”</i> |
|--|--|
| Varía la disposición de las articulaciones | Varía la disposición de las articulaciones |
| El tamaño viene definido por el diámetro de una esfera patrón | El tamaño viene definido por el diámetro de una esfera patrón |
| No varía la posición del objeto a medir | Se mide en 3 posiciones distintas |
| Se toman 9 puntos de palpado por esfera | Se toman 5 puntos de palpado por esfera |
| Se realizan 3 mediciones de diámetro | Se realizan 15 mediciones de diámetro |
| El error viene definido como la desviación entre el valor calculado y el calibrado | El error viene definido como la desviación entre el valor calculado y el calibrado |

La mayor diferencia entre los test de tamaño la vemos en la variación o no de la posición de diámetro a medir. Este aspecto conlleva que el análisis sugerido por la recomendación VDI tiene en cuenta la posible influencia que tiene el medir en un punto u otro en el campo de medición del brazo, más o menos cerca de los puntos límites de las articulaciones.

Otra diferencia importante es la cantidad de repeticiones llevadas a cabo en uno u otro test. Mientras que en la norma ASME se mide el diámetro en 3 ocasiones en la recomendación VDI este proceso es llevado a cabo hasta 15 veces, 5 veces por posición de la esfera.

Por último es significativo el número de puntos de la superficie de la esfera tomados para el cálculo del diámetro de ésta, siendo casi el doble en el caso de ASME.

Atendiendo a los resultados de las desviaciones obtenidas:

| ASME “Test de diámetro efectivo” | VDI “Test de error de palpado de tamaño” |
|-------------------------------------|---|
| 0.0127mm | 0.0236mm |
| 0.0307mm | 0.0933mm |
| 0.0074mm | 0.0490mm |

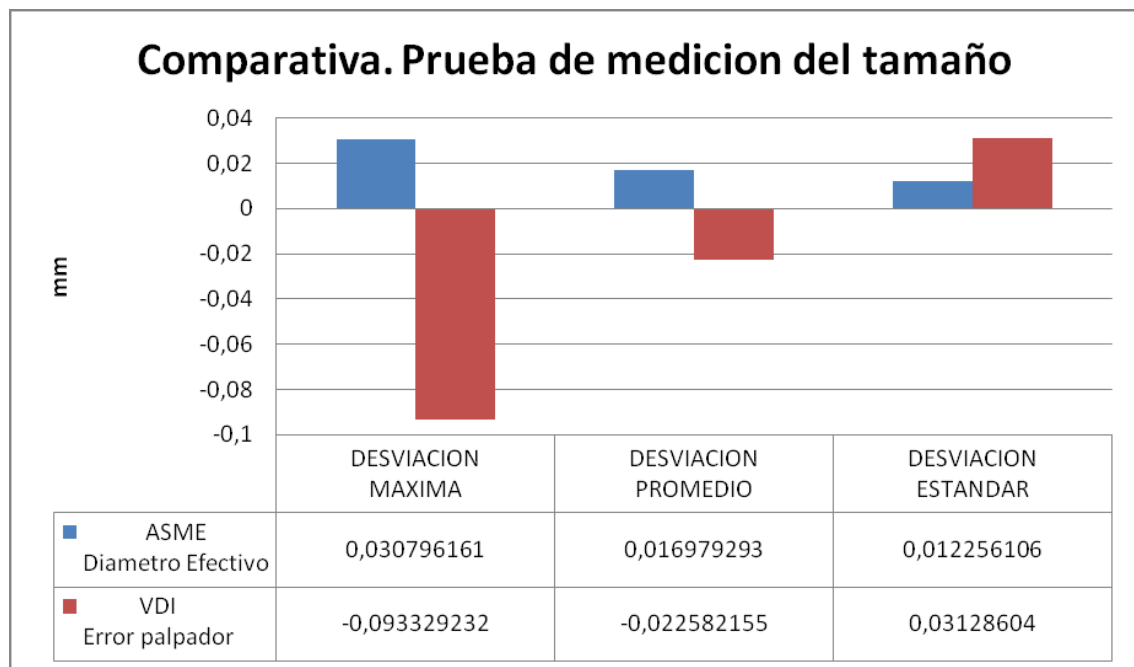


Fig. 4.1. Comparativa. Prueba de medición del tamaño

Cabe destacar que la mayor desviación obtenida en el test que sugiere la recomendación VDI se produce en la POSICION 2 que coincide con la única posición de medición que se ha tomado para la norma ASME. Esto implica que en nuestro caso no ha tenido influencia la posición del objeto de medir dentro del campo de medición o, al menos, la influencia no ha implicado un mayor error de medida.

Sin embargo sí que hemos obtenido un valor bastante más alto con el análisis de la VDI que con el de ASME. Esto puede ser debido a la gran diferencia de repeticiones que sugiere VDI y que aumentan la probabilidad de un mal palpado de puntos por parte del operario.

En el gráfico podemos observar tres aspectos importantes:

- El valor negativo del error máximo en VDI mientras que en ASME el error ha sido positivo y de valor mucho menor
- En el valor de desviación promedio los errores se igualan aunque cambiados de signo debido a que se contrarrestan valores positivos y negativos. Esta indica que el error máximo que muestra la VDI ha sido una desviación puntual y posiblemente debida a una medición defectuosa.
- El valor de desviación estándar ofrece a la prueba ASME una menor variabilidad de los datos, posiblemente debida al menor número de mediciones.

4.2 Análisis de errores en la medición de posiciones

Para detectar errores en la determinación de la posición de un punto ASME lleva a cabo el test “Prueba de repetibilidad de punto único” mientras que VDI sugiere el ensayo “Test de error de palpado de la posición”. Como ocurría en el caso anterior ambos ensayos comparten ciertas similitudes pero también existen diferencias.

| ASME <i>“Prueba repetibilidad punto único”</i> | VDI <i>“Test de error de palpado de la posición”</i> |
|---|---|
| Varía la disposición de las articulaciones | Varía la disposición de las articulaciones |
| La posición viene definida por un asiento cinemático | La posición viene definida por el centro de una esfera patrón |
| Se ensayan 3 distancias entre el objetivo y el brazo pero no varía la altura | Se mide en 3 posiciones distintas variando tanto la distancia al brazo como la altura |
| Cada posición se mide 10 veces | Cada posición se mide 5 veces |
| El cálculo del error se hace por desviación con respecto a la media de las mediciones | El cálculo del error se determina por la mayor diferencia entre mediciones |

Un aspecto que diferencia notablemente los dos ensayos es el elemento a través del cual se obtiene la posición a medir. En el caso de VDI se realiza el palpado de 5 puntos de una esfera patrón para luego, mediante cálculos, obtener su centro siendo este el punto a medir. ASME en cambio aconseja el uso de un asiento cinemático cónico que nos da con un único palpado, y sin necesidad de cálculos, la posición del punto. El

asiento cónico elimina errores de cálculo y también los errores de medición de forma de la esfera patrón.

Otro factor importante es la forma del cálculo del error. En este caso no se tiene un el valor exacto de la posición así que se debe hacer una aproximación. Mientras ASME indica que se debe calcular la media de cada coordenada y obtener la mayor de las distancias calculadas desde los puntos medidos hasta dicha media, VDI calcula directamente las distancias entre los puntos medidos y considera que el error es la mayor de estas.

Por último cabe destacar la consideración por parte de VDI del factor altura además del de distancia al brazo, lo que hace que algunas medidas puedan estar más cerca de los límites del brazo de medición.

Si observamos los resultados obtenidos:

| ASME “Prueba repetibilidad punto único” | VDI “Test de error de palpado de la posición” |
|--|--|
| 0.1401mm | 0.1719mm |
| 0.0773mm | 0.0685mm |
| 0.1919mm | 0.1625mm |

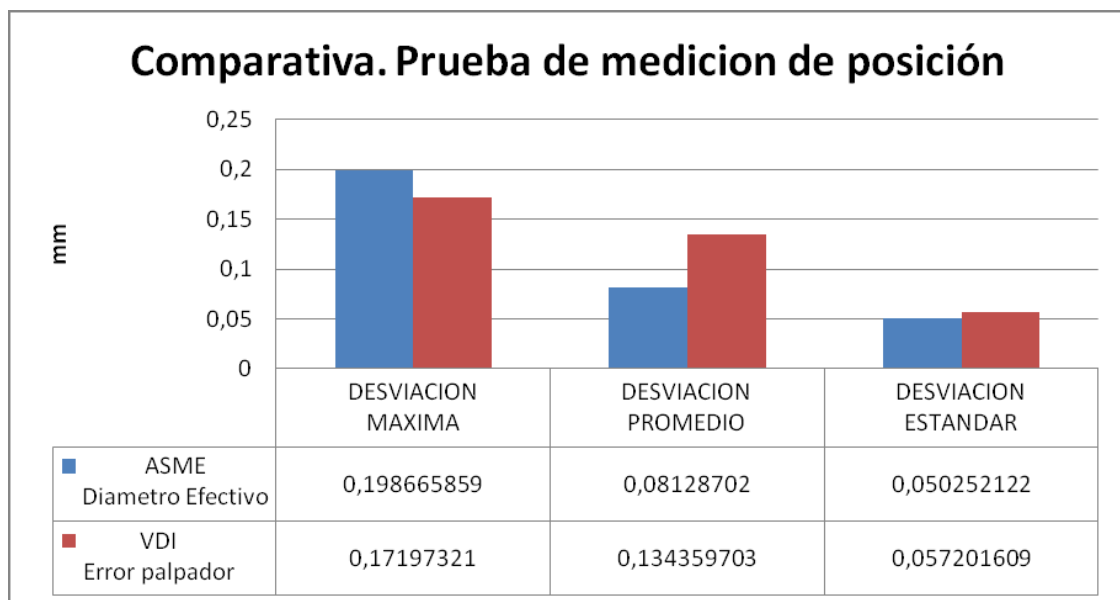


Fig. 4.2. Comparativa. Prueba de medición de la posición

Los puntos de medición tomados para las tres posiciones en los dos ensayos han sido similares y, aunque en el ensayo ASME el mayor error lo encontramos en la posición más alejada y en el VDI en la más cercana, los resultados obtenidos no difieren mucho entre sí.

Es importante puntualizar que al error de posición obtenido por VDI habría que sumarle la proporción correspondiente del error por medición de forma, que según el ensayo de “Test de error de palpado de forma es de 0.0236mm para la Posición 1, 0.0933mm para la Posición 2 y 0.0490mm para la Posición 3, factor este que no influye en el ensayo ASME al medirse directamente sobre un asiento cinemático.

Cabria esperar que por el método de cálculo del error, el ensayo VDI diera valores más altos, ya que se determinan distancias entre puntos medidos mientras que en ASME las distancias son hasta un punto medio, reduciéndose así considerablemente el valor obtenido. No obstante la posibilidad de que el error de medida incremente su valor por el factor humano de la medición es mayor en ASME ya que se realiza el doble de mediciones del punto que en VDI. Todos estos factores posibilitan que los errores obtenidos en los dos ensayos finalmente hayan resultado muy próximos.

En esta ocasión los dos ensayos obtienen valores muy similares de desviación máxima, y desviación estándar. No tanto ocurre en la desviación promedio, que nos indica que el error máximo observado en ASME es posiblemente ajeno al brazo de medición, mientras que el valor promedio en VDI está más cercano al error máximo.

4.3 Análisis de errores en la medición de longitudes

Para calcular el error que se comete al medir longitudes con el brazo de medición ASME propone realizar el ensayo “Test de precisión longitudinal volumétrica” mientras que VDI sugiere la “Prueba de error en la medición de longitudes”, dentro de esta última, debido a que nuestra barra patrón no alcanzaba el 66% de longitud del campo de medición del brazo, se ha optado por usar el método de volúmenes parciales, ya que el método de volumen completo implicaba mover la barra patrón longitudinalmente y aumentar la posibilidad de que aparecieran errores no intrínsecos al brazo de medición. A continuación resumimos las similitudes y diferencias de los dos ensayos:

| ASME <i>“Test de precisión longitudinal volumétrica”</i> | VDI <i>“Prueba de error en la medición de longitudes en volúmenes parciales”</i> |
|--|--|
| Se miden los dos extremos de la longitud mediante el cálculo del centro en esferas | Se miden los dos extremos de la longitud mediante el cálculo del centro en esferas |
| Varían las orientaciones, posiciones y longitudes de los tramos a medir | Varían las orientaciones, posiciones y longitudes de los tramos a medir |
| Se miden longitudes en 20 posiciones distintas | Se miden longitudes en 12 posiciones distintas |
| Se toman 5 puntos de palpado por esfera | Se toman 5 puntos de palpado por esfera |
| Se mide 1 longitud por posición y orientación (20 longitudes) | Se miden 5 longitudes por posición y orientación (60 longitudes) |
| Se realiza la medición una sola vez (20 mediciones) | Cada medición se realiza 3 veces (180 mediciones) |

Observando los dos métodos cabe destacar el número mucho mayor de mediciones que contiene el ensayo que propone VDI. Esta circunstancia asegura más la medición pero también aumenta la probabilidad de error humano en la medición y por tanto la necesidad de eliminar más mediciones mal realizadas.

Para comparar y verificar este aspecto, a continuación mostramos los datos indicando el error máximo agrupados por percentiles:

| PERCENTIL | ASME “Test de precisión longitudinal volumétrica” | VDI “Prueba de error en la medición de longitudes en volúmenes parciales” |
|-----------|---|--|
| 10% | 0,0207mm | 0,0092mm |
| 20% | 0,0257mm | 0,0202mm |
| 30% | 0,0275mm | 0,0339mm |
| 40% | 0,0439mm | 0,0725mm |
| 50% | 0,0725mm | 0,1098mm |
| 60% | 0,0848mm | 0,1247mm |
| 70% | 0,0907mm | 0,1549mm |
| 80% | 0,1237mm | 0,2279mm |
| 90% | 0,1603mm | 0,7253mm |
| 100% | 0,2545mm | 5,0155mm |

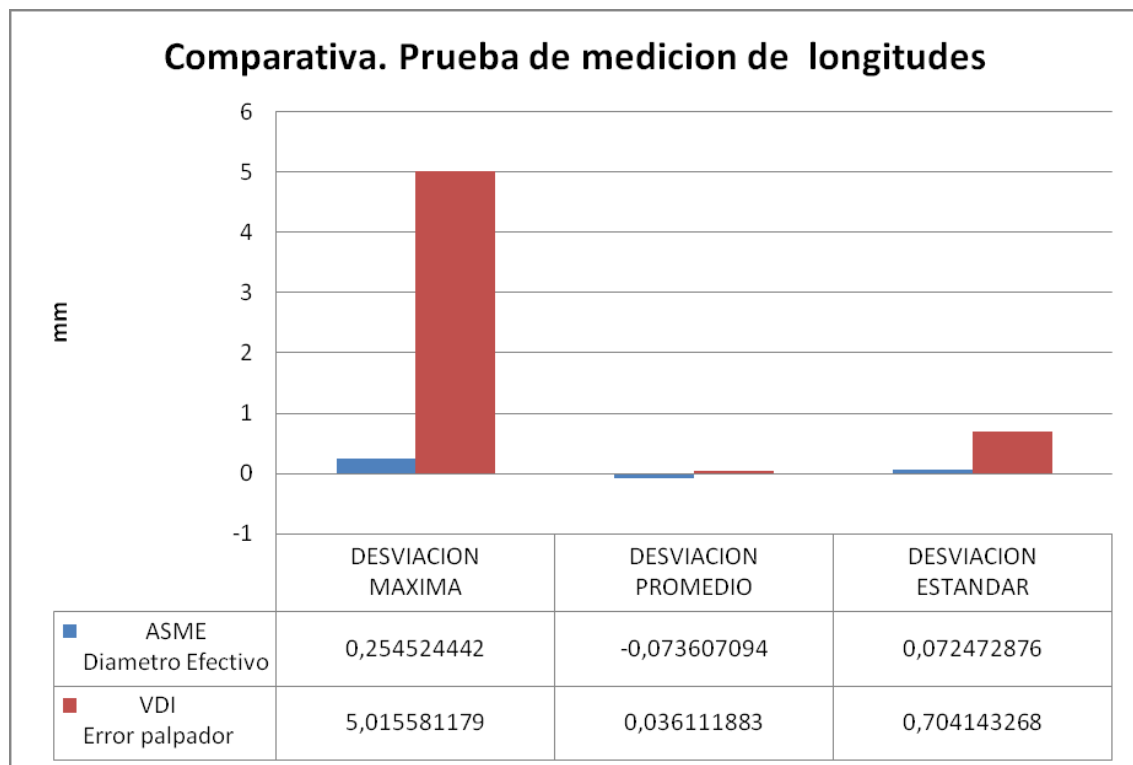


Fig. 4.3. Comparativa. Prueba de medición de longitudes

Como puede comprobarse en la tabla, hay un 30% de las mediciones en el ensayo VDI en el que el error es muy alto y no es acorde a los datos obtenidos por ASME. Estos errores tan altos en estas pocas mediciones seguramente son debidas a movimientos involuntarios del patrón o a una mala medición por parte del operario.

También vemos un aumento considerable del error en un 10% de las medidas tomadas según ASME seguramente también debidos a errores humanos y no propios del brazo.

El gráfico nos deja claro que el error que se produce en VDI es un error ajeno al brazo de medición y los valores promedios se compensan y toman valores muy bajos y similares entre sí. La desviación estándar por el contrario es mucho mayor en el caso de la norma VDI, lo que nos indica lo variable y sensible a agentes externos que puede llegar a ser este ensayo.

4.4 Criterios de verificación de resultados.

Cada una de las normativas tiene unos métodos distintos de aceptación de la especificación de rendimiento y precisión de la máquina evaluada.

En la directriz “VDI/VDE 2617”, cada valor de error de cada prueba realizada, debe situarse por debajo de un error máximo permisible, MPE. Por lo que el rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo articulado se verifica si todos los valores de error se encuentran dentro del rango de conformidad.

Por otro lado, la norma “ASME B89.4.22-2004” especifica que los valores de error deben situarse en zonas de error incluidos por el fabricante del equipo, pero en este caso, no se refiere a errores máximos permisibles, MPE, como la normativa anterior.

En ambos casos se refieren a unos valores de margen de error que el fabricante no distribuye, ya que para la máquina empleada, los únicos datos de precisión incluidos por el fabricante fueron el error verificado para la máquina en la “prueba de articulación de punto único (SPAT)” y “prueba de rendimiento volumétrico” de la norma “ASME B89.4.22-2004”.

Asimismo en caso de obtención de errores fuera de esos márgenes de error, se especifica que debe procederse de la siguiente manera:

La directriz “VDI/VDE 2617” únicamente especifica para la “prueba de error de indicación del tamaño de la medición” que cada longitud de la prueba que muestre un valor extremo, se medirá otras diez veces en la misma posición y dirección, y se verificará el rendimiento de la máquina de medición por coordenadas de brazo

articulado, si todos los valores del error de indicación para estas mediciones repetidas, se encuentran dentro del rango de conformidad.

Asimismo, la norma “ASME B89.4.22-2004” explica que si el resultado de la prueba se encuentra en una zona de rechazo de no más del 25% del valor de la especificación, entonces la prueba se puede repetir (una única vez). La media aritmética de los resultados de ambos ensayos, se considerará el resultado.

Para ambas normativas, una medida errónea debe ser repetida, puesto que en principio, ese error es achacable al operario. Pero para ambos casos, es difícil determinar durante la prueba si se ha realizado una medida errónea o no, fundamentalmente para la prueba de la directriz VDI/VDE, donde se determinan 585 esferas y no se localiza el error hasta que no se ha hecho un análisis completo de los resultados obtenidos. Es por ello que en esta norma es extremadamente importante el adecuado control del proceso y la pericia del operario ya que si no los ensayos serán no válidos y deberán ser repetidos.

En ASME la probabilidad de error del operario es menor al haber un número menor de mediciones. Por el contrario también resulta más difícil localizar un posible error de medición debido al menor número de repeticiones.

Capítulo 5. Análisis económico.

A la hora de que un laboratorio metrológico elija que procedimiento de ensayos llevar a cabo en el proceso de verificación de brazos de medición, además de la fiabilidad de los resultados debe tener en cuenta el coste que supone. Se trata de dar una estimación correcta de la validez del brazo a un precio asumible, por tanto el proceso deberá ser lo más económico posible.

Atendiendo al material necesario para la realización de los ensayos se precisará de una sala de ambiente controlado de la que se supone que el laboratorio ya dispone pues es necesaria para cualquier medición homologada. Además será necesario el siguiente material:

- Trípode para sujeción del brazo: 4000€
- Soporte de la barra patrón: 3500€
- Barra patrón: 6000€
- Asiento cinemático: 250€

Todos estos materiales son igualmente necesarios para la norma ASME que para la recomendación VDI, a excepción del asiento cinemático que únicamente lo precisa la norma ASME pero cuyo coste adicional no resulta significativo ante el coste del resto del material.

El brazo y el software del brazo no se ha valorado puesto que se supone que tanto uno como el otro lo facilitan el cliente dueño del brazo que se quiere verificar.

Visto que los costes de inversión van a ser los mismos independientemente del proceso de ensayo de verificación que se escoja, la diferencia de coste de un procedimiento u otro lo va a dar la cantidad de horas, y por tanto gasto de personal, necesarios para llevar a cabo los test. Este aspecto es el que se ha estudiado más a fondo, ya que se entiende que los gastos fijos de material se deberán ir amortizando poco a poco con el servicio de verificación de brazos de medición.

| TIEMPO INVERTIDO EN LOS ENSAYOS | |
|---|----------------|
| PROCESO | TIEMPO (HORAS) |
| Calibración del brazo | 0,25 |
| <u>ASME B89.4.22-2004</u> | |
| Diámetro efectivo | 0,5 |
| Repetibilidad de punto | 1 |
| Precisión longitudinal volumétrica | 5 |
| Suma | 6,75 |
| <u>VDI 2617. Parte 9 (volúmenes parciales)</u> | |
| Error de palpado | 2 |
| Error de indicación de longitud | 10 |
| Suma | 12,25 |

Hay que destacar la mayor del tiempo necesario son para la preparación y el posicionado de la barra patrón ocupando la medición un porcentaje muy pequeño del tiempo empleado.

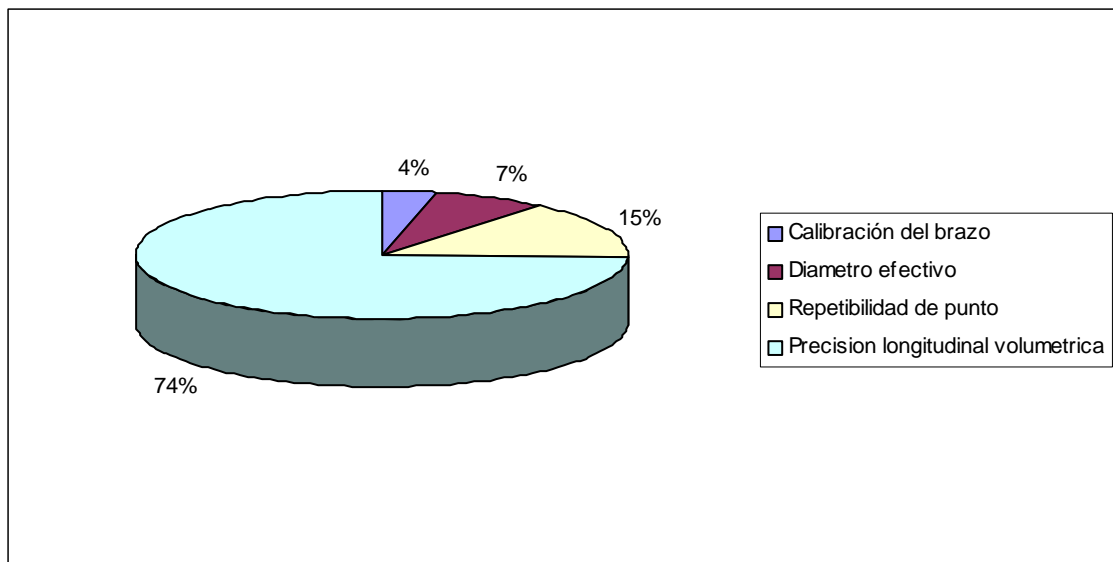


Fig. 5.1. Reparto temporal de los ensayos. ASME B89.4.22-2004.

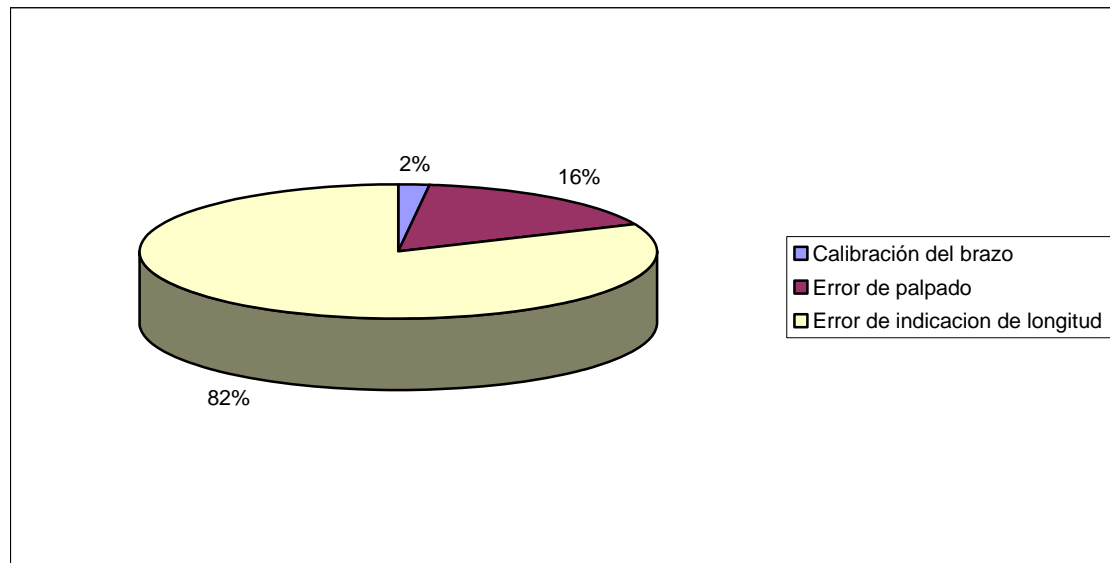


Fig. 5.2. Reparto temporal de los ensayos. VDI 2617. Parte 9 (volúmenes parciales).

Estos tiempos vienen condicionados por la falta de experiencia del operario que realiza estos test por primera vez. Si aplicamos un factor de corrección que reduzca el tiempo de ensayo debido a la experiencia y calculamos el coste económico que supone el recurso humano durante ese periodo de tiempo obtenemos:

| <u>COSTE ECONOMICO DE LOS ENSAYOS</u> | | | |
|---|----------------|-------------------------|-------------------|
| PROCESO | TIEMPO (HORAS) | TIEMPO CORREGIDO (x0,7) | COSTE (x50€/HORA) |
| Calibración del brazo | 0,25 | 0,175 | 8,75 |
| <u>ASME B89.4.22-2004</u> | | | |
| Diámetro efectivo | 0,5 | 0,35 | 17,5 |
| Repetibilidad de punto | 1 | 0,7 | 35 |
| Precisión longitudinal volum. | 5 | 3,5 | 175 |
| Suma | 6,75 | 4,725 | 236,25 |
| <u>VDI 2617. Parte 9 (volúmenes parciales)</u> | | | |
| Error de palpado | 2 | 1,4 | 70 |
| Error de indicación de longitud | 10 | 7,0 | 350 |
| Suma | 12,25 | 8,575 | 428,75 |

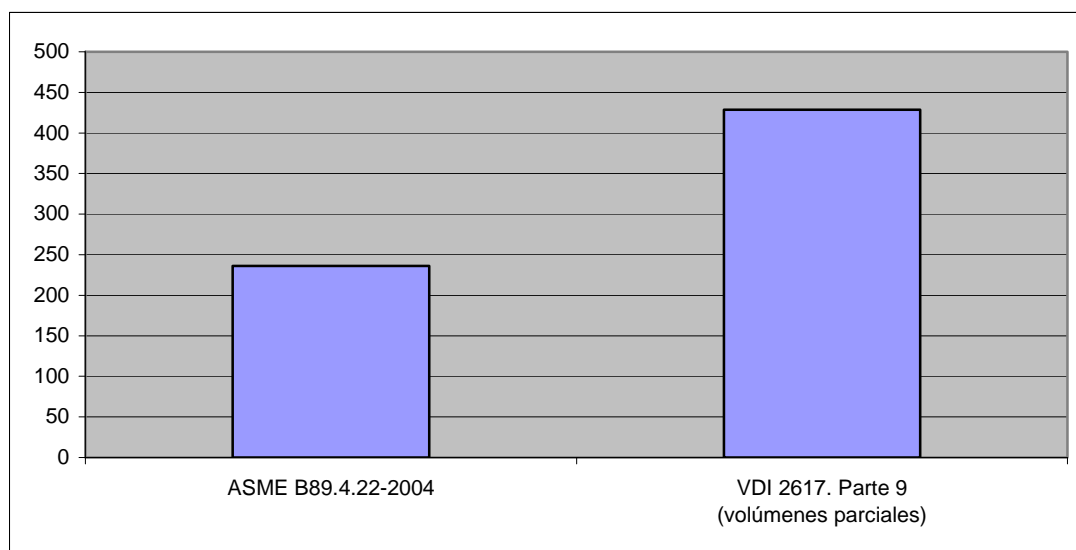


Fig. 5.3. Comparativa del coste económico de las dos propuestas de ensayos.

Capítulo 6. Conclusiones.

Vistos los resultados obtenidos en los ensayos que nos sugieren los dos textos, tanto la norma ASME como la directriz VDI, podemos llegar a la conclusión de que el brazo que se ha verificado produce unos errores de medición superiores a los indicados por el fabricante por lo que es aconsejable que se le realice un proceso de calibración.

Atendiendo a lo que nos dice el fabricante, el brazo en el momento de la certificación, 14 de Noviembre de 2007, obtenía unos resultados a la prueba de “punto único” de la norma ASME de $2\sigma=\pm 0.030\text{mm}$. Sin embargo, a 15 de Diciembre de 2009, la desviación obtenida en dicha prueba ha sido de $2\sigma_{\text{max}}=\pm 0.1986\text{mm}$.

El otro valor que nos da el fabricante es el correspondiente a la “prueba de rendimiento volumétrico” también referente a la prueba ASME. Según la calibración el error estaba en $2\text{RMS}=\pm 0.043\text{mm}$. y el error que se ha obtenido en nuestro ensayo correspondiente ha sido de $2\text{RMS}=\pm 0.2040\text{mm}$

Lo mismo ocurre con la interpretación que nos dan los límites MPE_E de la directriz VDI. Varios errores en las mediciones se salen de estos límites por lo que los valores de las mediciones no pueden considerarse válidos.

Como podemos comprobar estos errores son especialmente altos en a la hora de controlar la posición de un punto o realizar la mediciones de longitudes.

En cuanto a la valoración de los métodos de verificación, observamos que la directriz VDI es más estricta en su valoración a la hora de verificar el brazo, realizando un examen más exhaustivo de la medición y controlando más parámetros.

A continuación se hace un breve esquema de la carga de trabajo de cada ensayo valorándola por el número de palpados necesarios para llevar a cabo cada prueba.

| | POSICIONES INSPECCIONADAS | LONGITUDES | ESFERAS | PUNTOS POR ESFERA | REPETICIONES | VOLUMENES | PALPADOS TOTALES |
|-------------------------------|------------------------------|------------|---------|----------------------|--------------|-----------|---------------------|
| ASME B89.4.22-2004 | | | | | | | |
| DIAMETRO EFECTIVO | 1 | | 1 | 9 | 3 | 1 | 27 |
| PUNTO UNICO | 3 | | | | 10 | 1 | 30 |
| PRECISION LONGITUDINAL | 20 | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | 200 |
| TOTAL | | | | | | | 157 |
| VDI 2617. Parte 9 | | | | | | | |
| ERROR DE PALPADO | 3 | | 1 | 5 | 5 | 1 | 75 |
| LONGITUD VOLUMEN COMP. | 7 | 5 | 2 | 5 | 3 | 1 | 1050 |
| LONGITUD VOL. PARCIALES | 3 | 5 | 2 | 5 | 3 | 4 | 1800 |
| TOTAL C/VOL. COMPLETO | | | | | | | 2025 |
| TOTAL C/VOL. PARCIALES | | | | | | | 1875 |

Como puede comprobarse en la tabla anterior, el número de mediciones necesarias para llevar a cabo los ensayos reflejados en la recomendación VDI es más de diez veces superior a los necesarios para la realización de los ensayos que reflejan la norma ASME. Esta diferencia tiene lugar sobre todo en las pruebas de error referentes a la medición de longitudes. VDI analiza muchas más longitudes y además repite cada medición 3 veces, cosa que ASME no hace.

En nuestro caso, además, debido a la limitación del tamaño de la barra patrón de la que se disponía, se tuvo que optar por hacer el ensayo de “Error de indicación de la longitud” mediante volúmenes parciales. En el proceso de volúmenes parciales se analizan hasta 12 disposiciones de la barra patrón por 7 en el caso de analizar el volumen completo. Al tratarse de la versión más extendida de los ensayos recomendados por VDI, el coste temporal y por tanto económico del ensayo ha sido superior.

No obstante, aunque la diferencia entre las dos directrices en cuanto al número de mediciones necesarias sea altísima, la diferencia no se traduce en la misma medida a la hora de comparar los costes temporales y por tanto económicos de los procesos, los cuales son dos veces superior en el ensayo de la recomendación VDI que en la norma ASME.

En conclusión podemos decir que la directriz VDI se diferencia principalmente de la norma ASME en la introducción de algunos parámetros no considerados por ésta última (alturas, orientaciones del brazo...) y sobre todo en la repetición reiterativa de las mediciones.

Este aspecto de repetir tanto las mediciones conlleva la necesidad de que el operario que realiza los palpados debe ser muy experimentado y muy cuidadoso a la hora de llevar a cabo los ensayos ya que al haber tantas mediciones aumenta la probabilidad de errores humanos no achacables al brazo de medición. Estos errores son muy difíciles de detectar durante el proceso y se detectan principalmente en el análisis de resultados, obligando la aparición de éstos a la repetición completa del ensayo. Por el contrario ASME no repite los resultados, eso se traduce en una mayor celeridad de la verificación pero también en la posibilidad de errores no detectables que variarían el resultado del diagnóstico del brazo.

Como opinión personal, se considera un ensayo más correcto el que sugiere la recomendación VDI, pero llevado a cabo por un operario con gran experiencia y pocas posibilidades de cometer errores humanos en las mediciones ya que el tener que repetir los ensayos encarecería mucho el proceso. Además sería aconsejable contar con una barra patrón más larga que nos permita realizar con garantías el ensayo longitudinal volumétrico que propone en su modelo de “Volumen Completo” con el fin de reducir algo la carga laboral que los volúmenes parciales suponen y reducir diferencias de coste con la normativa ASME vigente en EEUU.